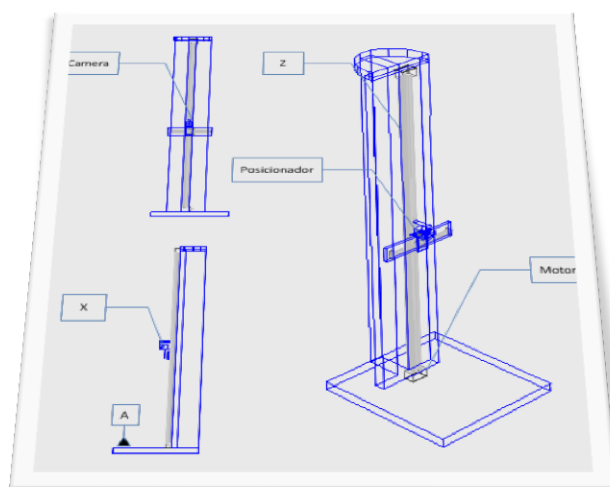


Métrica Vertebral – Automático



Desenvolvimento e construção de um sistema de posicionamento X/Z, com motores passo a passo.

Pedro Gustavo Ferreira Raposo Duque

Dissertação apresentada no Departamento de Física na
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Biomédica.

Orientador: Prof. Doutor Pedro Vieira

Co-Orientador: Dra. Cláudia Quaresma

Outubro 2010

Agradecimentos

Gostaria de deixar um agradecimento especial à minha família, pela incrível paciência e apoio que me deram durante este curso. Especialmente à minha Mãe e ao meu Pai, por todo o esforço e dedicação durante os meus anos de formação académica.

Quero agradecer a todos os meus amigos pela amizade e apoio, e em especial ao Nuno Pinto, Manuela Mendes e João Mendes, pela força e ajuda imprescindível na realização deste projecto.

Gostaria de agradecer também aos meus Orientadores de projecto:

Prof. Doutor Pedro Vieira e Dra. Cláudia Quaresma pela oportunidade que me concederam de colaborar neste projecto.

Um desejo de felicidades e um obrigado aos meus colegas (agora amigos!):

António Jordão e Carla França.

Por último gostaria de dedicar este trabalho à Patrícia, incansável e crente companheira!

Obrigado, sabes que sem ti, tudo isto não seria possível! ;)

Índice

Agradecimentos	ii
Índice	iii
Simbologia e Notações	iv
Resumo	v
Abstract	vi
Introdução	vii
Objectivos	x
Estado da arte	xi
1- Introdução teórica	1
1.1 – Sistema parafuso sem fim	1
1.2 – Calha com guias lineares e correia	3
1.3 – Motores	5
1.3.1 – Relutância Variável	6
1.3.2 – Ímanes permanentes	7
1.3.3 – Híbridos	10
1.3.4 – Modos de funcionamento	12
1.3.4.1 – Wave Drive	12
1.3.4.2 – Full-step	13
1.3.4.3 – Half-step.....	13
1.3.4.4 – Microstepping	14
1.3.5 – Dimensão	16
1.4 – Drivers	17
2– Desenvolvimento do posicionador X/Z	18
2.1 – Mesa Linear X	19
2.2 – Calha Z	21
2.3 – Motores seleccionados	22
2.4 – Resolução	25
2.5 – Driver	26
2.6 – Fins de curso	28
2.7 – Desenho de peças	30
2.7.1 – Acoplamentos	30
2.7.2 – Suportes	31
3– Desenvolvimento da electrónica de controlo	34

3.1 – Microcontrolador	35
3.2 – Oscilador	37
3.3 – Ficha de programação	37
3.4 – Comunicação RS232	38
3.5 – Fins de curso	41
3.6 – Drivers motores	42
3.7 – Relés	43
3.8 – LED's	44
3.9 – LCD	45
3.10 – Fontes de alimentação	46
3.11 – Circuito Electrónico	47
3.12 – Montagem Hardware	50
4– Programação do microcontrolador	52
4.1 – Protocolo RS232	53
4.2 – Programa	55
4.2.1 – Rotina de Interrupts	56
4.2.2 – Rotina de Inicialização	57
4.2.3 – Rotina status process	58
4.2.4 – Rotina RS232 Process	59
4.2.5 – Rotina speed control	60
4.2.6 – Rotina motor control	61
4.2.7 – Rotina get linear position	62
4.2.8 – Rotina relay process	62
4.2.9 – Rotina command process	63
5– Testes e desempenho	64
6– Conclusão e perspectivas futuras	66
Referências	68
Anexos	A
Lista de comandos	B
Orçamento do projecto	L
Configuração Driver R325	M
Programa <i>Métrica Controller V1.0</i>	N
Desenhos Técnicos	O
Circuito electrónico do <i>Métrica Controller</i>	P

Simbologia e Notações

LED – Light Emission Diode

LCD – Liquid cristal display

CT – Computer Tomography

DC – Direct current (corrente contínua)

AC – Alternated current (corrente alternada)

NEMA – National Electrical Manufactures Association

Driver – Dispositivo que fornece corrente, tensão.

LOW – Sinal lógico 0.

HIGH – Sinal lógico 1.

EEPROM - Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory

Breakpoint – Pausa intencional num programa para realizar debugging.

Debug – Método de encontrar e corrigir erros de software.

Interrupt – Rotina de *software* que é chamada e executada pelo processador, interrompendo o programa, assim que esta termina, o programa retoma.

Resumo

A presente dissertação insere-se num projecto de desenvolvimento de um sistema inovador na área da saúde. O projecto **Métrica Vertebral – Automático**, resulta da necessidade de evoluir o actual Métrica Vertebral. O Métrica Vertebral – Automático foi desenvolvido para automatizar a recolha das coordenadas, e a representação tridimensional da coluna vertebral.

Nesta dissertação projectou-se e construiu-se todo o sistema mecânico e electrónico que permitiu posicionar um conjunto de instrumentos, nas duas coordenadas X (horizontal) e Z (vertical). Foram usados motores passo a passo, para permitir um posicionamento rigoroso (inferior a 0,2 mm), mesas lineares e calhas com correias para deslocar o posicionador com uma amplitude de 2000 mm na vertical (Z) e 300 mm na horizontal (X). A velocidade máxima conseguida na direcção vertical foi de 250 mm/s, enquanto que na direcção horizontal foi de aproximadamente 100 mm/s.

Utilizaram-se uma mesa linear e uma calha com correia do fabricante IGUS™, e motores passo a passo híbridos, do fabricante Lin Engineering™. A electrónica de controlo foi desenvolvida e construída, bem como todas as peças de suporte e acoplamento mecânico.

O sistema apresentou o comportamento esperado, conseguindo-se uma resolução no posicionamento superior à dos requisitos técnicos, e uma boa integração na globalidade do projecto **Métrica Vertebral – Automático**.

Palavras-Chave

Coluna Vertebral, Métrica, motor passo a passo, mesa linear, calha com correia

Abstract

This dissertation addresses work being performed within the context of an innovative system in the health area. The *Métrica Vertebral – Automático* project, results of the necessity of an on evolution of the current *Métrica Vertebral*. The main objective of the system is to perform an automatic retrieval of the coordinate's data, and to produce a tri-dimensional representation of the vertebral column.

This dissertation proposed to build all the necessary hardware of the system in terms of mechanical components and electronic control, in order to position several instruments in both coordinates X (horizontal) and Z (vertical). To allow a precise and rigorous positioning (inferior to 0.2mm), step motors were used. The usage of leadscrew linear guides and toothed belt drives permitted a full dislocation of the positioner device with a 2000mm reach in the vertical (Z) and 300mm on the horizontal (X) plains. The maximum speed achieved on the vertical plain was of 250 mm/s, and 100 mm/s on the vertical plain.

In terms of the hardware used the leadscrew linear guide and toothed belt drive were manufactured by IGUS™, and the hybrid the step motors by Lin Engineering™. All the control electronics were developed and constructed for this project, as well as all the mechanical coupling and support hardware.

In terms of experimental validation the system behaved as expected, achieving a positioning resolution higher than the demanded technical requisites. A successful integration with the remainder of the *Métrica Vertebral – Automático* was also accomplished.

The thesis is completed by the depiction of the achieved results with the subsequent discussion and identification of open points as a result of the work done.

Keyword

Metrical, Column, Step motor, Toothed belt drive, Leadscrew linear guide

O Instrumento Métrica Vertebral ^[1] desenvolvido por: Dra. Cláudia Quaresma, Prof. Dr. Mário Forjaz Secca e Filipe Santos, tem produzido importantes resultados no estudo das disfunções e perturbações da coluna vertebral. O sucesso no estudo de disfunções vertebrais em mulheres grávidas, resultou em seis artigos científicos, entre eles, “*Development of a Mechanical Instrument to Evaluate Biomechanically the Spinal Column In Pregnant Women*” ^[1], “*Validation of Vertebral Metrics: A Mechanical Instrument to Evaluate Posture of the Spinal Column*” ^[2] e “*Comparative evaluation of the tridimensional spine position measured with a new instrument (Vertebral Metrics) and an Optoelectronic System of Stereophotogrammetry*” ^[3] bem como diversas participações em congressos e encontros científicos.

O *Métrica Vertebral* é um instrumento que permite a medição da posição do vértice das apófises espinhosas. As coordenadas espaciais (X,Y,Z) de cada vértebra são obtidas através de um sistema de posicionamento de pequenas alhetas, cada uma permitindo um ajuste nas três coordenadas. Estas são ajustadas individualmente até coincidirem com a posição das vértebras do paciente, após esse posicionamento manual, a posição global de cada um dos posicionadores, representa a coluna vertebral da pessoa em estudo ^[1].

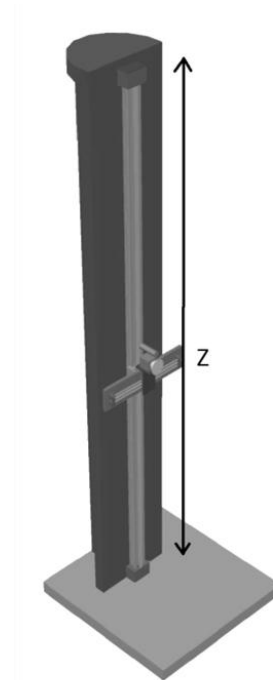
A necessidade de automatizar o processo de recolha da posição das vértebras, levou ao desenvolvimento do projecto **Métrica Vertebral – Automático**, este projecto foi dividido em três devido à sua complexidade e limitado tempo de desenvolvimento. Os três componentes do projecto são:

- i) **Desenvolvimento e construção de um sistema de posicionamento automático X/Z, com motores passo a passo.** (Pedro Gustavo Ferreira Raposo Duque)
- ii) Desenvolvimento de um *software* de detecção de apófises espinhosas e cálculo da distância antero-posterior. (António Jordão)
- iii) Desenvolvimento de um algoritmo de reconstrução e representação a 3 dimensões da coluna vertebral a partir de coordenadas da superfície das apófises espinhosas. (Carla França)

O **Métrica Vertebral - Automático** é uma evolução do Métrica Vertebral ^[1], o novo instrumento permite adquirir as coordenadas das vértebras de um modo semi-automático, ou seja, são marcados pontos com uma caneta hipoalérgica na projecção cutânea do vértice das apófises espinhosas de cada uma das vértebras, o sistema inicia a aquisição das coordenadas dos pontos utilizando uma câmara e um laser, que são posicionados mecanicamente através de motores passo a passo. Após a detecção das coordenadas das posições das vértebras, é realizada uma representação tridimensional da coluna vertebral.



a)



b)

Figura 1 – a) Métrica Vertebral; b) Métrica Vertebral Automático.

Objectivos

Com a necessidade da recolha automática das coordenadas X/Y/Z da posição das vértebras, surge o primeiro objectivo do Métrica Vertebral - Automático, o desenvolvimento e construção de um sistema de posicionamento automático X/Z, com motores passo a passo.

O âmbito da presente dissertação inclui a construção do sistema mecânico de posicionamento dos instrumentos, câmara, laser e iluminação, nas coordenadas X/Z, bem como o desenvolvimento da electrónica de controlo e a sua implementação.

As especificações técnicas deste sistema foram definidas entre os vários intervenientes do projecto.

Definiu-se que o sistema de posicionamento X/Z teria como requisitos mínimos os seguintes parâmetros:

- 1) Deslocamento em Z (vertical) de 2 metros.
- 2) Deslocamento em X (horizontal) de 0,1 metros (100 milímetros).
- 3) O sistema deve percorrer 1 metro na direcção Z em 30 segundos ,ou seja, 0.03 m/s de velocidade mínima.
- 4) Deve existir um protocolo de comunicação série, com uma lista de comandos possíveis de serem executados a partir de uma ligação RS232.
- 5) O sistema deve posicionar-se nas coordenadas enviadas pelo *software* de aquisição, e a posição X deve ser atingida antes da coordenada Z.
- 6) Deve ter uma resolução de pelo menos 0,5 mm no posicionamento X e Z.
- 7) Deve suportar o peso do equipamento de aquisição de imagem, câmara de vídeo, iluminação e laser.
- 8) A electrónica de controlo deve permitir ligar/desligar a iluminação e o laser.

9) As vibrações do movimento do sistema devem ser minimizadas.

10) Poderá existir um ecrã LCD (opcional).

Foi definido ainda que as coordenadas para a medição da posição das apófises espinhosas, seriam as seguintes:

- Distância horizontal, eixo X.
- Distância vertical, eixo Z.
- Distância antero-posterior das vértebras, eixo Y.

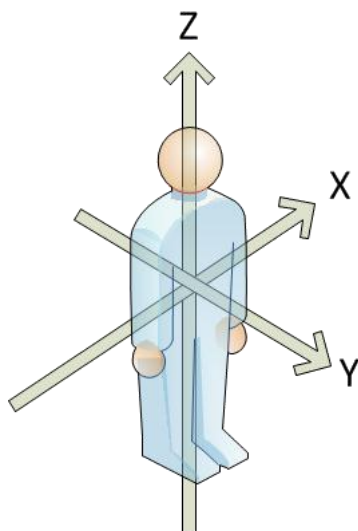


Figura 2 - Coordenadas utilizadas no métrica vertebral automático.

Os métodos complementares de diagnóstico de patologias no âmbito da ortopedia, resumem-se aos exames de imagiologia, nomeadamente o Raio-X e CT (Computer Tomography) e Ressonância Magnética (em situações particulares). O mais utilizado é o Raio-X, a sua principal característica é o uso de radiação ionizante, prejudicial aos tecidos vivos. Este facto limita o uso em seres humanos, em frequência de exames (dose) e população alvo.

Nas crianças e mulheres grávidas, o uso de instrumentos não invasivos, sem o uso de radiação ionizante, torna-se imperativo. O *Métrica Vertebral* dá um passo importante nesse sentido, disponibilizando um método auxiliar de diagnóstico das patologias da coluna.

Com o desenvolvimento do *Métrica Vertebral – Automático*, o processo de aquisição de dados do paciente é acelerado e facilitado. Este equipamento promete criar um impacto positivo na qualidade de vida dos pacientes portadores de patologias da coluna.

1.Introdução Teórica

Existem diferentes abordagens/soluções para a construção de um sistema de posicionamento vertical. Entre eles destaca-se a solução com um parafuso sem fim (fuso) e a solução com uma calha/correia.

Neste capítulo iremos avaliar as diferenças entre as duas soluções, e concluir sobre a selecção mais adequada para este projecto.

1.1) Sistema com parafuso sem fim

Nesta solução, existe um parafuso que ao rodar faz deslocar uma peça no sentido perpendicular ao de rotação. A velocidade de translação linear depende da velocidade de rotação do parafuso e o passo deste. O passo é de um modo simples, a distância entre os “dentes” do parafuso, e é definido pela distância percorrida linearmente por cada revolução completa do parafuso. Assim se tivermos um parafuso com um passo de 5 mm e uma porca acoplada, isto significa que por cada volta completa deste, a porca avança 5 mm linearmente ^[4].



Figura 3 – Parafuso sem fim, ou Fuso.

A força necessária para fazer mover a porca no parafuso sem fim é dada pelo torque. O torque, é a força necessária para rodar um objecto no seu eixo de rotação. A amplitude do torque depende de 3 grandezas, a força aplicada (F), o braço de força r

(distância em relação ao eixo de rotação onde é aplicada a força) e o ângulo α entre os dois [5].

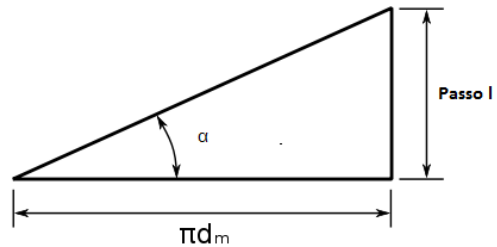
$$\vec{T} = \vec{r} \times \vec{F} = rF \sin \alpha \quad \text{Equação 1}$$

O torque (T) necessário para rodar um parafuso e movimentar linearmente uma porca com uma determinada carga (F), num eixo vertical, é dado por:

$$T_{up} = \frac{Fd_m}{2} \left(\frac{l + \pi \mu d_m}{\pi d_m - \mu l} \right) \quad \text{Equação 2}$$

em que:

- T_{up} = Torque
- F = Carga no parafuso
- d_m = Diâmetro do parafuso
- μ = Coeficiente de atrito
- l = Passo do parafuso



A título de exemplo, consideremos uma carga de 49 N (5Kg), com um parafuso de 10 mm de diâmetro e um passo de 4 mm, um coeficiente de atrito de 0.11, o torque necessário para elevar esta carga com este parafuso seria, $T = 0.058 \text{ Nm}$.

Para dimensionamento de torque de motores, considera-se a seguinte equação [4]:

$$T_{total} = T_{up} + T_R + T_P \quad \text{Equação 3}$$

em que, T_R e T_P são respectivamente *restraining torque* e *preloaded torque*.

$$T_R = \frac{F \cdot l \cdot \eta}{2000 \cdot \pi} \quad \text{Equação 4} \quad \text{e} \quad T_P = \frac{F_P \cdot l}{1000 \cdot \pi} \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \quad \text{Equação 5}$$

com:

- F [N] = Carga
- l [mm] = passo do parafuso
- η = Eficiência da porca/parafuso
- F_P = carga aplicada pela porca

Os sistemas com parafusos sem fim são usados em inúmeras aplicações mecânicas. Uma das suas limitações é a distância máxima entre dois pontos de fixação. Quanto maior for esta distância maior é a probabilidade de ocorrer compressão e deformação no parafuso.

Para construir uma solução de posicionamento deste tipo, são necessários diversos componentes, como por exemplo, chumaceiras, rolamentos, guias lineares, entre outros. Uma das dificuldades inerentes a uma solução deste tipo para o posicionador vertical seria o correcto alinhamento de todos os componentes.

Considerou-se o seguinte protótipo (Figura 4).

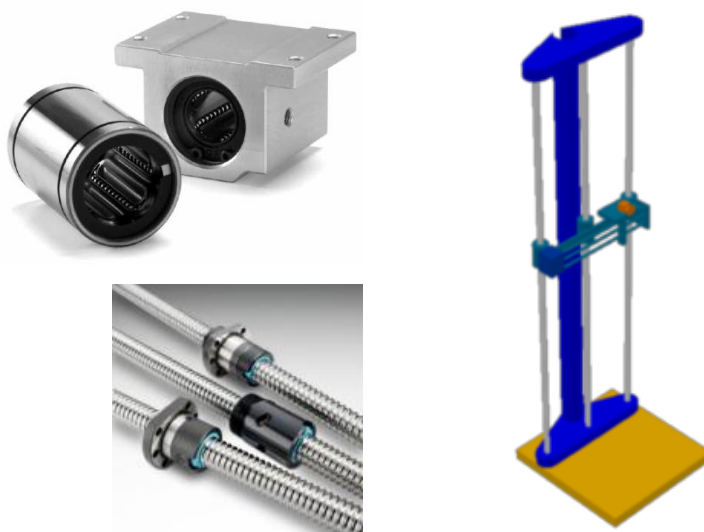


Figura 4 - Protótipo 1, exemplo de chumaceiras e rolamentos.

1.2) Calha com guias lineares e correia

Outra solução na conversão de movimento angular em linear, é usar uma correia e uma calha. O sistema de suporte é assegurado por guias lineares (ver figura 5).

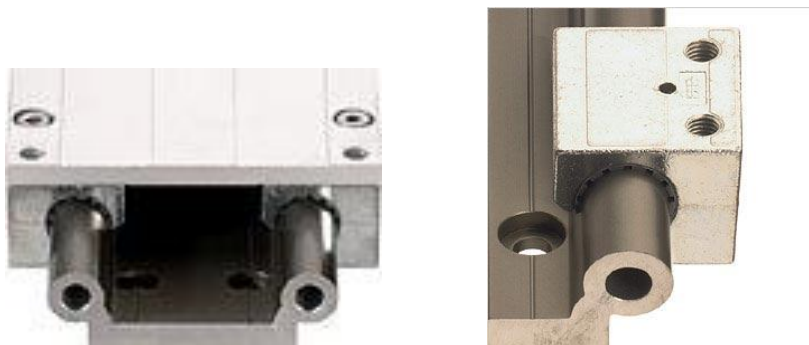


Figura 5 - Sistema com guias lineares.

A translação do carrinho é feita através de uma correia que está ligada a um eixo acoplado ao motor.



Figura 6 - Exemplos de guias lineares do tipo calha + correia.

Esta solução é mais robusta que a solução do parafuso sem fim, no entanto a precisão do posicionamento é menor.



Figura 7 - Ideia do protótipo 2.

Após alguns contactos com fabricantes de guias lineares e parafusos sem fim, nomeadamente o fabricante SKF™ e o IGUS™, foi-nos aconselhado o uso da calha com correia em vez da solução do parafuso, devido às dimensões pretendidas (em relação ao peso). Para a dimensão pretendida 2 m de altura, o parafuso teria de ter um diâmetro mínimo de $\phi 30$ mm, e toda a estrutura seria difícil de implementar devido aos alinhamentos de todos os componentes. A solução adoptada foi então a solução apresentada na figura 7, o protótipo 2.

1.3) Motores

Os motores utilizados neste projecto são do tipo passo a passo. Um motor passo a passo é um dispositivo electromecânico que converte impulsos eléctricos em deslocamentos angulares discretos ^[6]. O veio do motor roda em incrementos (passos) discretos quando lhe são aplicados impulsos eléctricos numa sequência correcta. O comportamento do motor está directamente relacionado com os impulsos que lhe são fornecidos:

- A sequência dos impulsos determina a direcção de rotação do veio motor;
- A frequência dos impulsos determina a velocidade de rotação do veio do motor;
- A duração da rotação depende do número de impulsos aplicados.

Este tipo de motores tem vantagens e desvantagens sobre os motores de convencionais (de escova) DC/AC:

Vantagens:

- A velocidade de rotação do veio do motor é proporcional à frequência dos impulsos.
- O motor tem máximo torque quando está parado. Em presença de carga permite travar quando está parado.
- Posicionamento preciso do veio do motor bem como repetibilidade.
- Excelente resposta nos arranques, paragens e inversões de sentido.
- Muito fiável já que não existem escovas de contacto eléctrico entre o veio e o motor.
- Torque elevado para rotações baixas.
- Não são necessários sensores e dispositivos de “feedback” no posicionamento, visto que a posição é determinada pelo número de impulsos que são aplicados.

Desvantagens:

- Pode ocorrer ressonância a determinadas velocidades, o que se traduz em vibrações mecânicas prejudiciais ao sistema.
- Baixo torque e difícil controlo, para velocidades de rotação do veio do motor, muito altas.

Existem diferentes tipos de motores passo a passo, variam em particular no torque produzido, rotações por minuto (rpm), na dimensão e finalmente na resolução angular. A resolução angular determina quantos passos o eixo do motor tem de realizar até concluir

uma rotação completa de 360°. Tipicamente existem motores passo a passo com passos de 45°, 1.8°, 0.9° e 0.45°, podemos calcular a resolução dos motores através da equação:

$$\text{Passos por volta} = 360^\circ / \text{rotação por passo} ;$$

Tabela 1 - Resolução de um motor passo a passo.

Rotação por passo	Passos por volta	Resolução do motor
45°	8	Fraca
1.8°	200	Boa
0.9°	400	Muito boa
0.45°	800	Excelente

Existem 3 tipos de motores passo a passo ^[6]: 1) Relutância variável, 2) Ímanes permanentes, 3) Híbridos.

1.3.1) Relutância variável (*Variable reluctance*)

Este tipo de motor passo a passo é constituído por um rotor semelhante a uma roda dentada, fabricado num material ferromagnético e por um estator com enrolamentos que produzem os campos magnéticos. O material ferromagnético possui melhor permeabilidade magnética do que o ar. É este o princípio físico em que se baseia este motor, é o facto de um fluxo de campo magnético procurar o caminho com maior permeabilidade magnética. Assim, quando os enrolamentos são alimentados os pólos do estator atraem os “dentes” do rotor mais próximos, é desenvolvido um binário que faz rodar o rotor para uma posição de relutância mínima, resultando numa rotação do veio do motor ^[6].

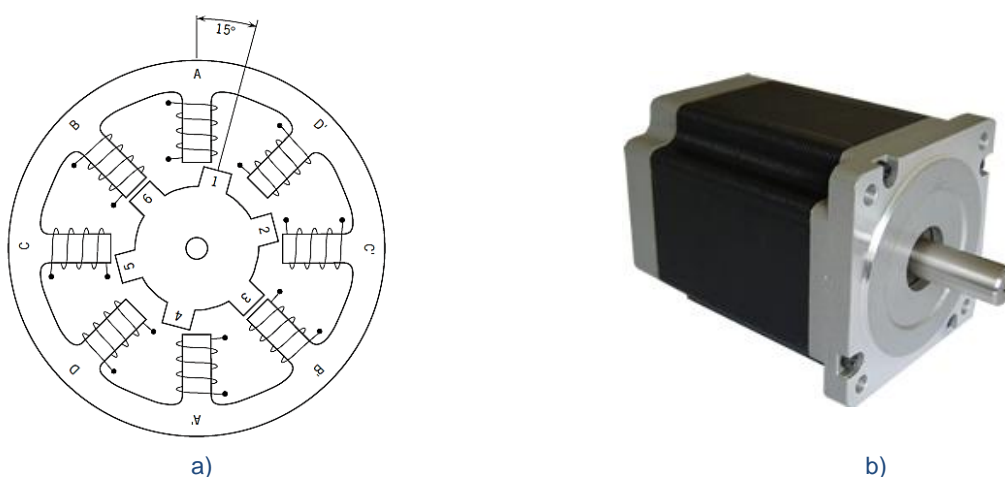


Figura 8 – a) Esquema de uma secção de um motor de relutância magnética. b) Motor de relutância magnética.

A figura 8a representa uma secção do motor de relutância variável, quando o enrolamento BB' é alimentado, os dentes 3 e 6 do rotor são atraídos pelo campo magnético, resultando numa rotação do eixo do motor. Uma sequência correcta de alimentação dos enrolamentos completa uma rotação do veio [8].

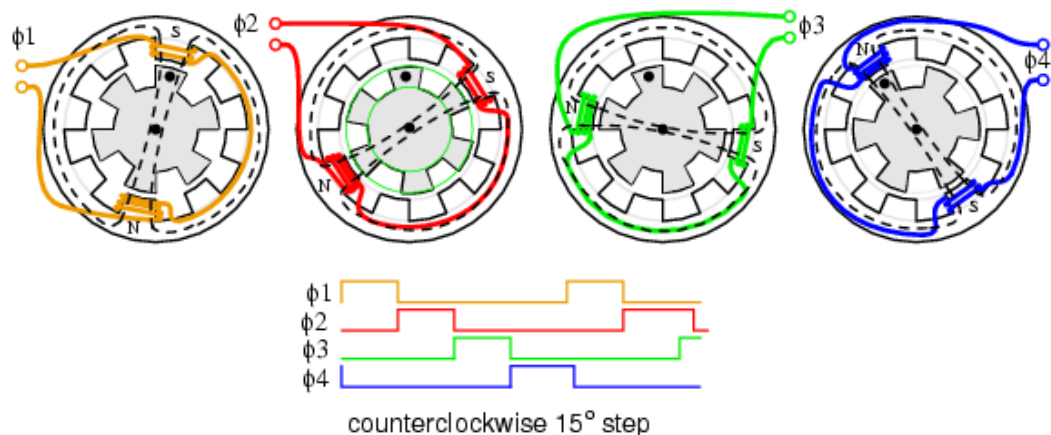


Figura 9 – Sequência de passos para um motor de relutância variável. Esquema de uma rotação de 15° do veio do motor. A direcção de rotação do rotor é contrária à da aplicada na alimentação dos enrolamentos.

Neste tipo de motor não existe binário remanescente quando é desligada a alimentação nos enrolamentos, o rotor deixa de estar magnetizado e roda livremente na ausência de campo magnético. Podemos enumerar algumas vantagens e desvantagens do motor de relutância variável:

Vantagens:

- Possibilidade de efectuar pequenos passos (depende do número de dentes do rotor e do número de fases).
- Não é sensível à direcção da corrente.
- Possibilidade de atingir altas velocidades.

Desvantagens:

- Não existência de binário remanescente.
- Construção mais complexa.
- Baixo rendimento.

1.3.2) Ímanes Permanentes

No caso dos motores de ímanes permanentes, o rotor possui ímanes permanentes com pólos norte e sul alternados, alinhados paralelamente ao veio do motor. No estator encontram-se os enrolamentos que produzem o campo magnético [6].

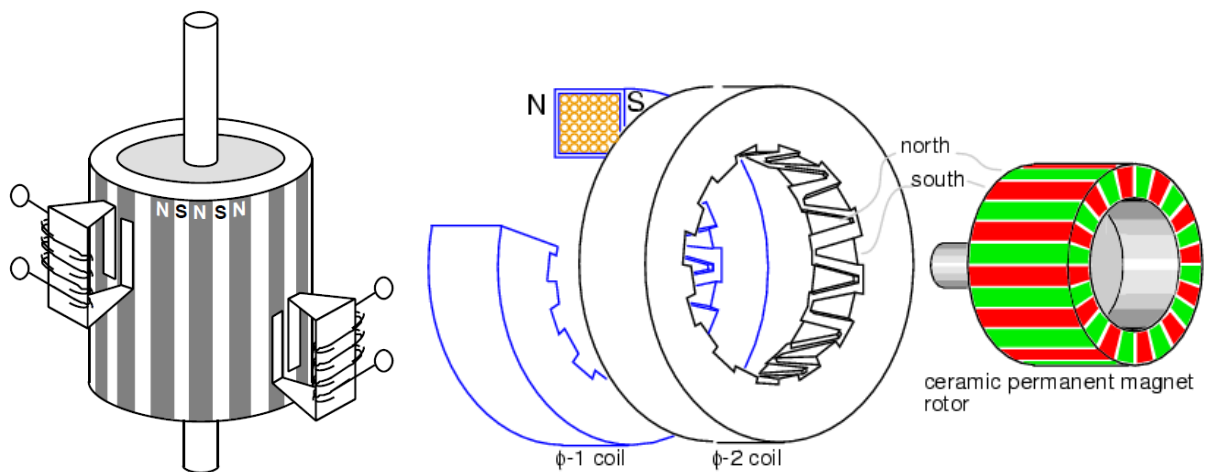


Figura 10 - Rotor de um motor de ímanes permanentes. O estator é composto normalmente por dois enrolamentos, que produzem pólos magnéticos opostos.

Esta configuração oferece um aumento na intensidade do fluxo magnético e consecutivamente, um aumento no torque em relação aos motores de relutância variável.

A alimentação dos enrolamentos origina um alinhamento dos pólos do rotor em relação aos pólos criados pelas bobinas. O sentido de rotação do veio do motor, depende do sentido da corrente nos enrolamentos.

Os enrolamentos num motor de ímanes permanentes podem ser de dois tipos, **unipolar** ou **bipolar** ^[7].

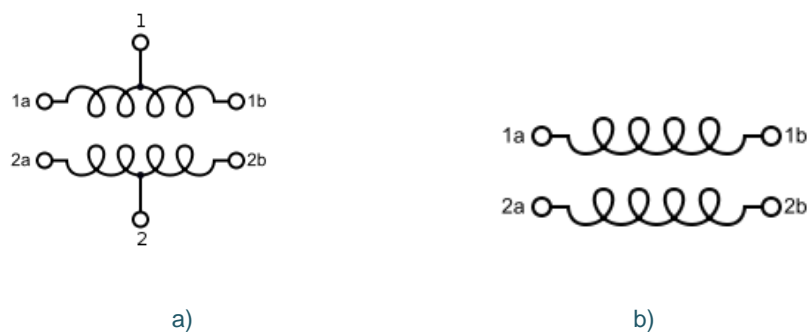


Figura 11 - Enrolamentos do tipo unipolar (a) e bipolar (b).

A alimentação unipolar impõe correntes de alimentação dos enrolamentos do motor unidireccionais. Cada enrolamento é alimentado com uma corrente positiva durante uma fracção do ciclo e desligado no restante tempo. A corrente neste tipo de enrolamentos flui sempre no mesmo sentido. O motor unipolar comporta-se como se tivesse quatro enrolamentos (podemos considerar 4 bobinas independentes: 1-1a; 1-1b; 2-2a; 2-2b, ver figura 11), e por isso quatro fases distintas ^[8].

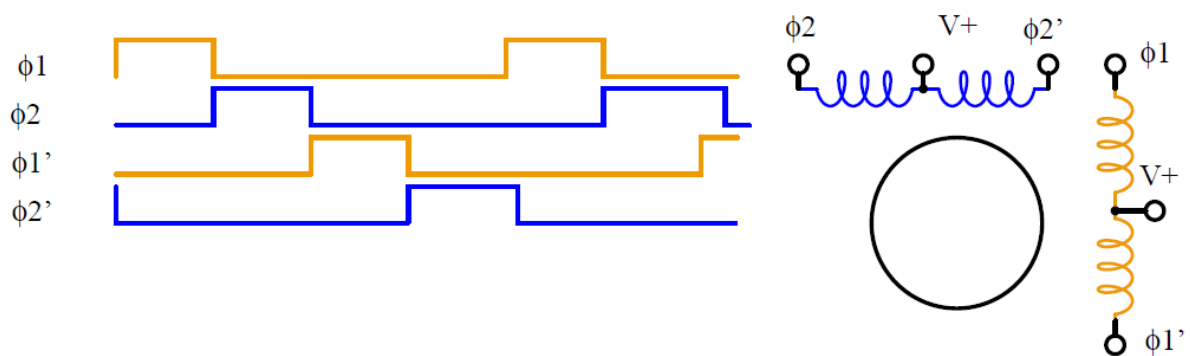


Figura 12 - Onda de alimentação de um motor unipolar.

No caso de um enrolamento bipolar, a alimentação bipolar impõe correntes de alimentação bidireccionais nas fases ^[8].

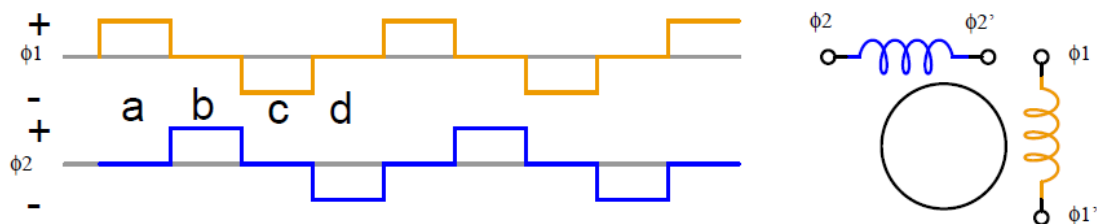


Figura 13 - Onda de alimentação de um motor bipolar.

Neste caso as correntes têm de ser invertidas (figura 13 – c e d) para se completar um ciclo de 4 passos.

Um motor de ímanes permanentes mantém algum binário remanescente quando é desligada a alimentação nos enrolamentos. Podemos enumerar algumas vantagens e desvantagens do motor de ímanes permanentes:

Vantagens:

- Existência de binário remanescente.
- Baixo custo.
- Construção mecânica simples.

Desvantagens:

- Poucos passos por rotação.
- Impossibilidade de rodar livremente.

Vantagens (continuação):

- Maior binário disponível.
- Elevado rendimento.

1.3.3) Híbridos

O motor passo a passo híbrido combina as características dos rotores do motor de ímanes permanentes com o de relutância variável. As boas características do motor híbrido resultam da combinação das vantagens do íman permanente (binário elevado) e dos “dentes” do rotor do motor de relutância variável (grande número de passos por rotação).

O rotor do híbrido é composto por um íman permanente com magnetização axial, associado a estruturas ferromagnéticas “dentadas” e colocadas a dois níveis diferentes, desfasadas entre si em meio passo angular. Os dentes da parte superior do rotor estão magnetizados com o pólo (norte) oposto da parte inferior do rotor (sul) [6].

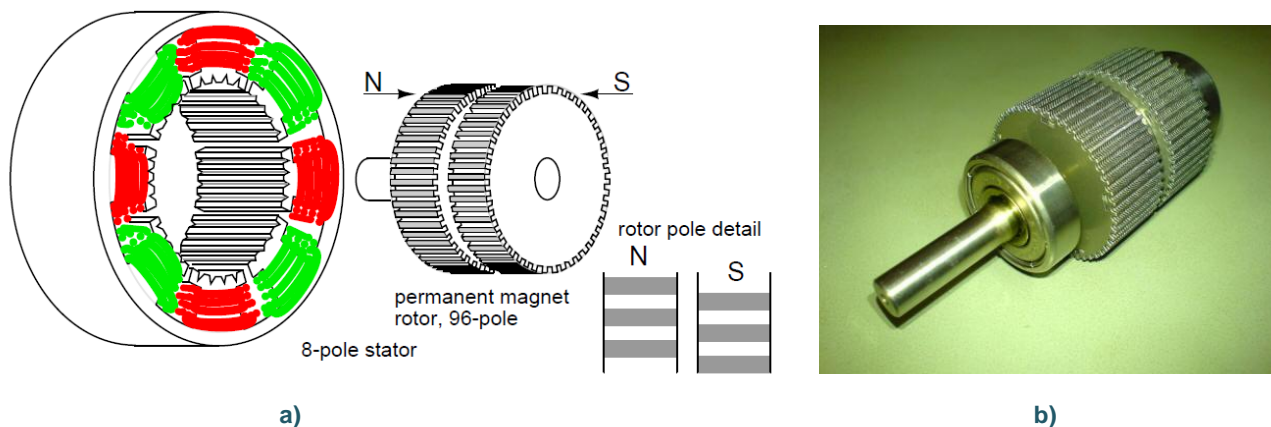


Figura 14 - a) Esquema de um motor híbrido. b) Fotografia de um rotor de um motor híbrido.

O estator está dividido em duas fases ($\phi 1$ e $\phi 2$), estas duas fases estão desfasadas entre si em $\frac{1}{4}$ de passo, o que permite um alinhamento do pólo norte e do sul simultaneamente nos dois níveis do rotor (ver figura 15) [8].

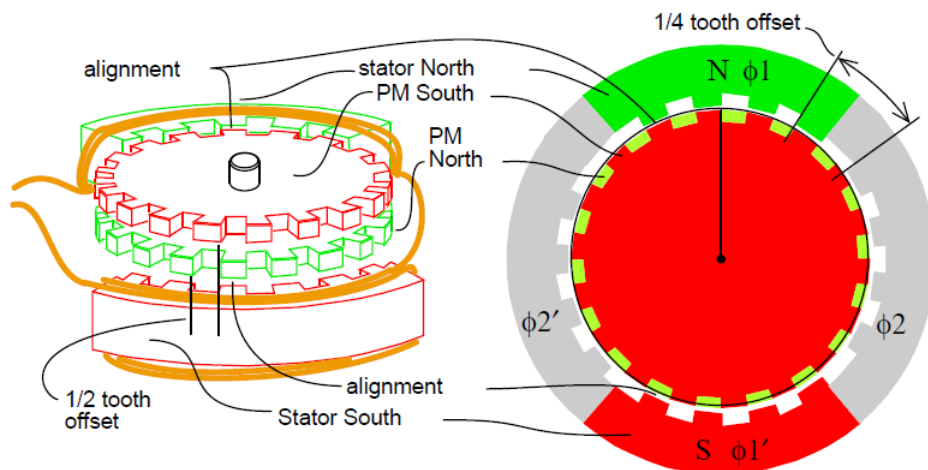


Figura 15 – Neste diagrama pode observar-se o estator $\phi 1$ alimentado (Norte a verde), os dentes do rotor superior (pólo sul a vermelho) alinham-se com o estator superior; ao mesmo tempo o estator inferior $\phi 1'$ alimentado com um campo magnético sul alinha os dentes do rotor inferior (pólo sul a verde). Nesta situação observa-se o desfasamento ($\frac{1}{4}$ de passo) do rotor entre as duas fases $\phi 1$ e $\phi 2$, este desfasamento permite, no próximo ciclo, o alinhamento do rotor com a fase $\phi 2$ e $\phi 2'$.

Na figura seguinte podemos observar a sequência de rotação de um motor híbrido, cada variação nas fases resulta numa rotação de apenas $\frac{1}{4}$ de passo, a sequência apresentada pela figura 16, faz rodar o veio do motor apenas $\frac{1}{2}$ passo ^[8].

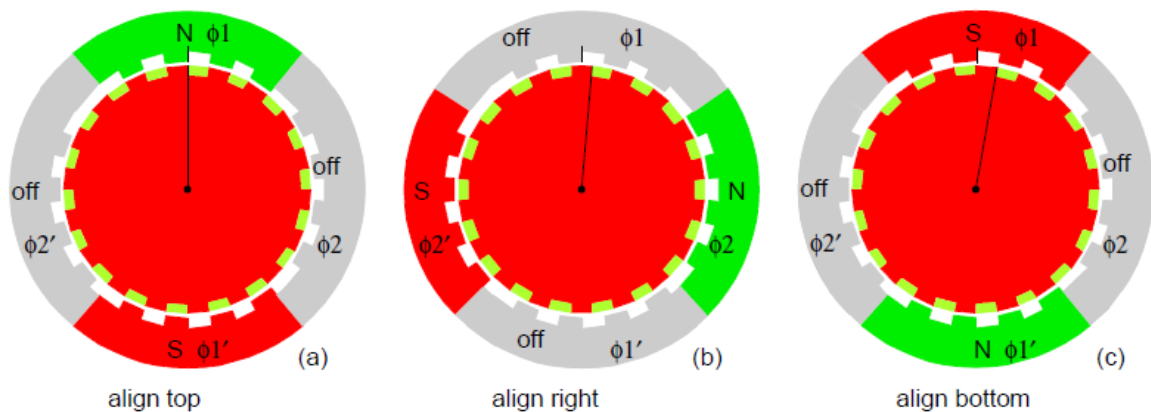


Figura 16 – Sequência de rotação de um motor híbrido. Esta sequência representa uma rotação do veio do motor, de apenas $\frac{1}{2}$ passo.

As vantagens e desvantagens do motor passo a passo híbrido são:

Vantagens:

- Existência de binário remanescente.
- Bom rendimento.
- Número elevado de passos por rotação.
- Binário elevado.

Desvantagens:

- Construção complexa.
- Impossibilidade de rodar livremente.
- Força electromotriz induzida.
- Inércia inicial alta.

1.3.4) Modos de funcionamento

Os enrolamentos do motor podem ser alimentados com diferentes sequências temporais de alimentação, que lhes conferem características diferentes no funcionamento, são elas, *Wave drive*, *Full-step*, *Half-step* e *Microstepping* ^[8].

1.3.4.1) Wave Drive:

O modo *wave drive* é a maneira mais simples de se controlar um motor passo a passo. Cada enrolamento é alimentado sequencialmente, um após o outro, assim o rotor é alinhado consecutivamente com os pólos do enrolamento alimentado ^[8].

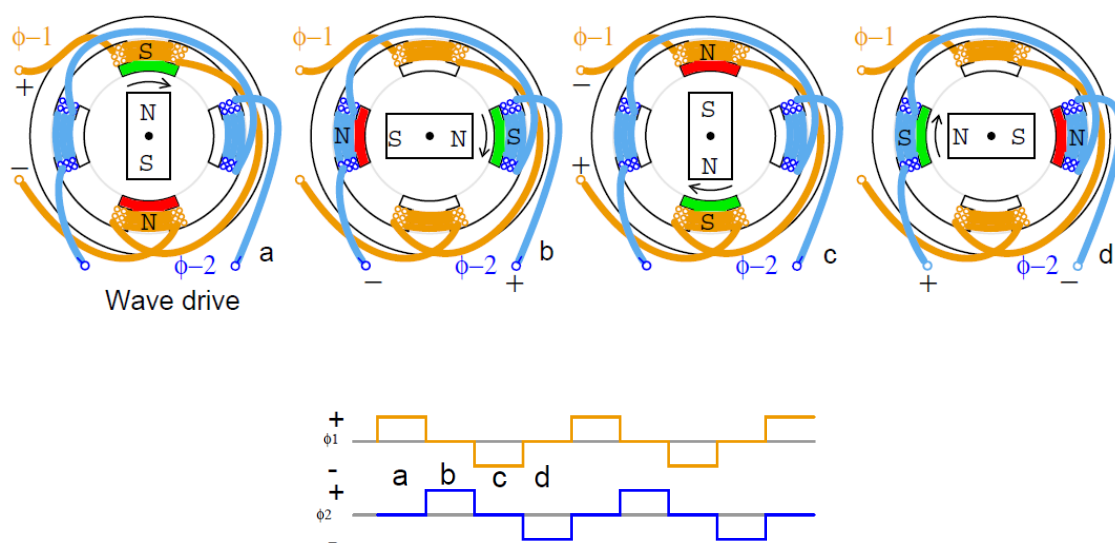


Figura 17 - Sequência de alimentação no modo *wave drive*. Neste modo o rotor alinha-se com o único enrolamento alimentado do estator.

1.3.4.2) Full-step:

No modo *Full-step* os dois enrolamentos são alimentados simultaneamente. O binário do motor é maximizado porque o rotor é atraído para uma posição intermédia entre os dois pólos, ficando sobre a acção dos dois campos magnéticos gerados pelos dois enrolamentos ^[8].

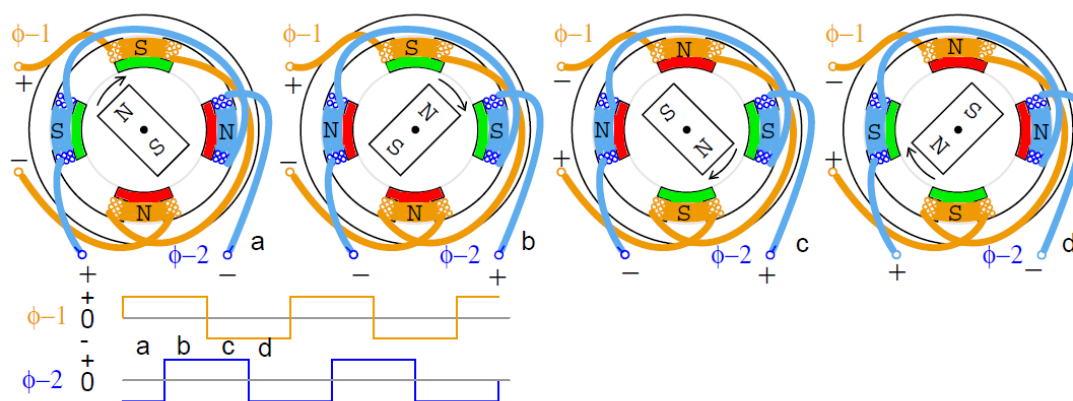


Figura 18 - Alimentação dos enrolamentos no modo Full-step. Posição do rotor em relação ao estator.

O rotor nunca fica alinhado com um dos enrolamentos do estator, este modo de funcionamento produz os mesmos passos que o modo anterior, *wave drive*, mas o binário é mais elevado.

1.3.4.3) Half-step:

Neste modo de funcionamento os enrolamentos são alimentados numa sequência que resulta da combinação dos dois modos anteriores. Um enrolamento alimentado seguido dos dois simultaneamente, e novamente, apenas um ^[8].

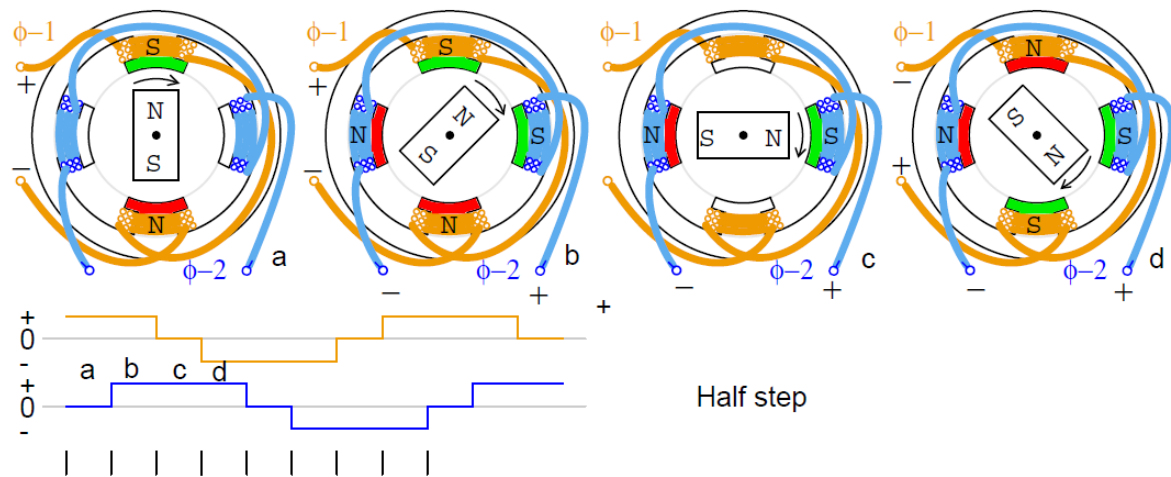


Figura 19- Alimentação dos enrolamentos no modo Half-step. Posição do rotor em relação ao estator.

Neste modo o rotor é posicionado entre os dois enrolamentos (figura 19 – b), mas também fica alinhado com o enrolamento alimentado no passo seguinte (c).

A principal vantagem deste modo é a duplicação do número de passos que o motor pode fazer para completar uma revolução completa de 360°. Um motor com um ângulo de revolução de 0.9° por passo, passa a ter 0.45° de revolução por passo. Consegue-se mais precisão num posicionamento, no entanto este modo tem menos torque disponível do que o modo *Full-step* [8].

1.3.4.4) Microstepping:

No modo de *microstepping*, as ondas quadradas de alimentação dos modos anteriores são substituídas por ondas sinusoidais. Este modo tem como principal vantagem a redução da vibração dos motores, já que as transições das correntes entre os enrolamentos são feitas de um modo progressivo, ao contrário da onda quadrada. A principal desvantagem é a redução de torque em comparação com o modo *Full-step*.

A figura 20 representa os diferentes modos de alimentação das fases dos enrolamentos. O modo *microstepping* aproxima-se de uma onda sinusoidal através de pequenos incrementos de corrente nas bobinas [9].

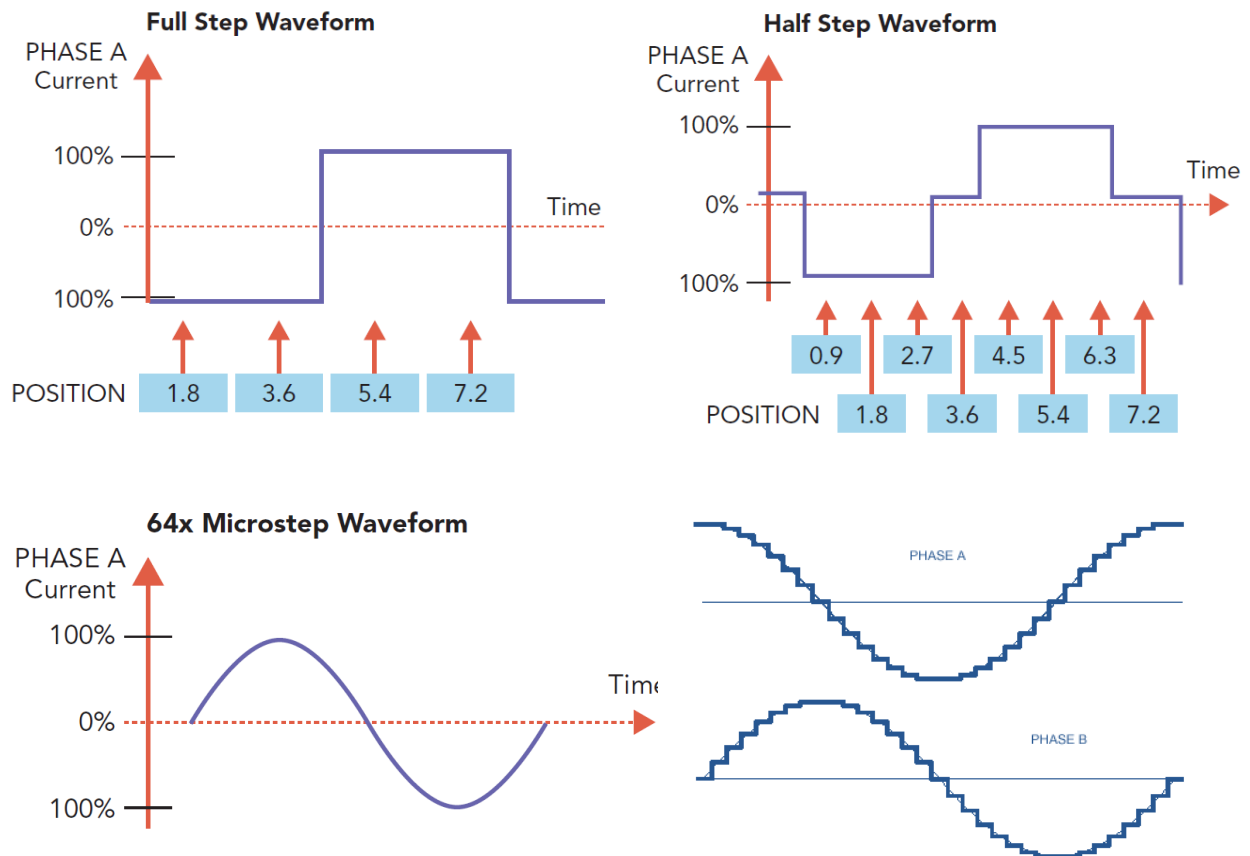


Figura 20 - Alimentação das fases VS tempo VS posição, para os modos de funcionamento, Full-step, Half-step e 64x microstep. A última figura mostra que a contribuição de pequenas ondas quadradas aproxima-se de uma onda sinusoidal ^[9].

Os *drivers* modernos de controlo dos motores passo a passo, já possuem capacidade para gerar micro-passos, tipicamente 4x, 8x, 16x, 32x, 64x, 128x, 256x.

Neste modo é notório o aumento de suavidade na rotação e consequente diminuição de ressonância, no entanto a aparente alta resolução dos passos (teoricamente a 256x um motor com um passo 1.8° passaria a ter 0.007° de resolução) é difícil de atingir devido aos próprios erros de posicionamento do rotor com incrementos tão pequenos.

O *microstepping* torna-se importante em aplicações que exigem suavidade de rotação por parte dos motores passo a passo.

1.3.5) Dimensão

Os motores passo a passo têm dimensões normalizadas para permitir uma integração mais simplificada nos projectos. A norma foi definida pela *National Electrical Manufacturers Association (NEMA)*, e define as principais dimensões de um motor passo a passo. A figura 21 juntamente com a tabela 2 apresentam os valores normalizados da norma NEMA ^[11].

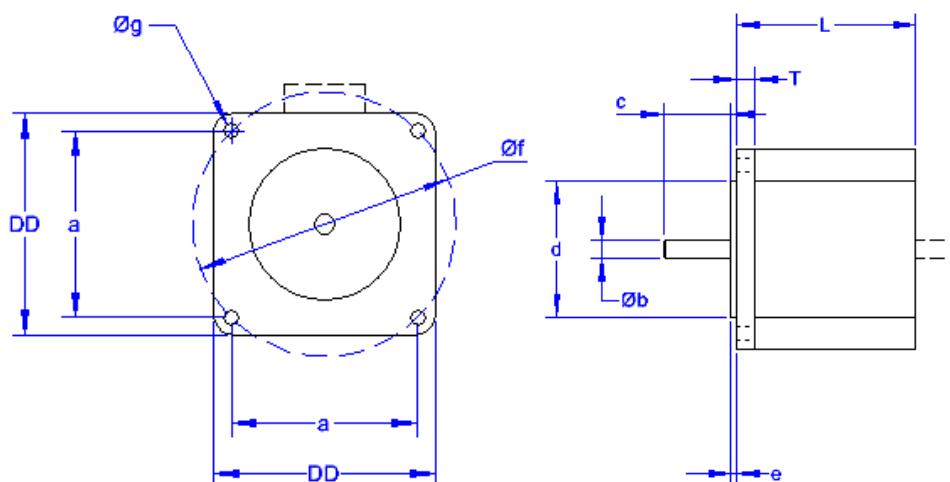


Figura 21 – Desenho técnico das dimensões de um motor passo a passo segunda a norma NEMA.

Tabela 2 - Dimensões da norma NEMA.

Dimensão	NEMA 8	NEMA 11	NEMA 14	NEMA 17	NEMA 23	NEMA 34	NEMA 42
DD	0.8 ' (20.32 mm)	1.1 ' (27.94 mm)	1.4 ' (35.56 mm)	1.7 ' (43.18 mm)	2.3 ' (58.42 mm)	3.4 ' (86.36 mm)	4.2 ' (106.68 mm)
a	16 mm	23 mm	26 mm	31 mm	47.14 mm	69.7 mm	88.9 mm
b	4 mm	5 mm	5 mm	5 mm	6.35 mm	9.5 mm	16 mm
c	-	-	-	24 mm	20.57 mm	31.75 mm	35 mm
d	15 mm	22 mm	22 mm	22 mm	38.1 mm	73 mm	55.5 mm
e	1.5 mm	2 mm	2 mm	2 mm	1.6 mm	1.6 mm	1.6 mm
f	-	-	-	43.8 mm	66.7 mm	98.4 mm	125.73 mm
g	3 mm	4 mm	4 mm	4-40 UNC	5 mm	5.5 mm	7.13 mm

1.4) Drivers dos motores

O desempenho de um motor passo a passo está estritamente relacionado com a electrónica de controlo deste. Esse circuito electrónico denomina-se de “*driver*”.

O *driver* do motor é o circuito electrónico que controla a corrente e a tensão que é fornecida aos enrolamentos do motor passo a passo. Uma boa combinação entre estas duas grandezas permite movimentos mais suaves e com menos ressonância por parte dos motores, mas principalmente permite uma maximização do binário do motor em velocidades mais elevadas.

As duas soluções mais frequentes são o *driver L/R* e o *driver chopper*^[7].

Driver L/R (limited/resistance):

Neste tipo de circuito electrónico, a tensão é mantida constante nos enrolamentos do motor, assim, o binário é conseguido através da corrente que passa pelos enrolamentos. A corrente em cada enrolamento é limitada pela resistência das enrolamentos pela lei de ohm (equação 6), enquanto que a velocidade em que essa corrente pode variar no enrolamento depende da indução da bobina, L, dada pela equação 7.

$$I = \frac{V}{R} \quad \text{Equação 6 - Lei de Ohm ;} \quad \frac{dI}{dt} = \frac{V}{L} \quad \text{Equação 7 - Indutância.}$$

Assim a velocidade máxima de um motor passo a passo controlado por um *driver L/R* é limitada pela sua indutância, já que esta limita a velocidade com que a corrente pode comutar o sentido.

Driver Chopper:

Neste tipo de driver, a corrente é mantida aproximadamente constante. A cada passo do veio do motor é aplicada uma tensão elevada, que causa uma subida rápida da corrente no enrolamento dada pela equação 7, com V muito alto. A corrente em cada enrolamento é monitorizada pelo driver, e quando esta atinge um determinado limite, a tensão é cortada (*chopped*). Quando a corrente baixa de um determinado limite a tensão é ligada novamente, assim a corrente é mantida relativamente constante durante um passo.

Este circuito electrónico é bastante mais complexo do que o do L/R, pois necessita de um circuito de medição de corrente e controlo da tensão mais rigoroso do que o L/R. A grande vantagem é a obtenção de torques mais elevados para velocidades mais elevadas, bem como uma maior eficiência do *driver*.

2) DESENVOLVIMENTO do Posicionador X/Z

Tendo em conta as especificações técnicas, procedeu-se ao desenvolvimento do posicionador X/Z. A ideia inicial foi construir um dispositivo que pudesse movimentar um conjunto de instrumentos na direcção Z e ao mesmo tempo posicionar os mesmos na direcção X. A direcção vertical (Z) seria a mais exigente em termos de projecto pois teria de deslocar também o posicionador horizontal (X).

Para o posicionador definiu-se um conjunto de componentes necessários:

- Estrutura móvel para a direcção Z
- Estrutura móvel para a direcção X
- Motor passo a passo para a direcção Z
- Motor passo a passo para a direcção X.
- Drivers para os motores X e Z.
- Detectores de fim de curso para os limites das estruturas.
- Peças de suporte e acoplamento.

Projectou-se o seguinte protótipo, ver figura 22. A plataforma que sustenta os instrumentos passa a denominar-se de **posicionador**.

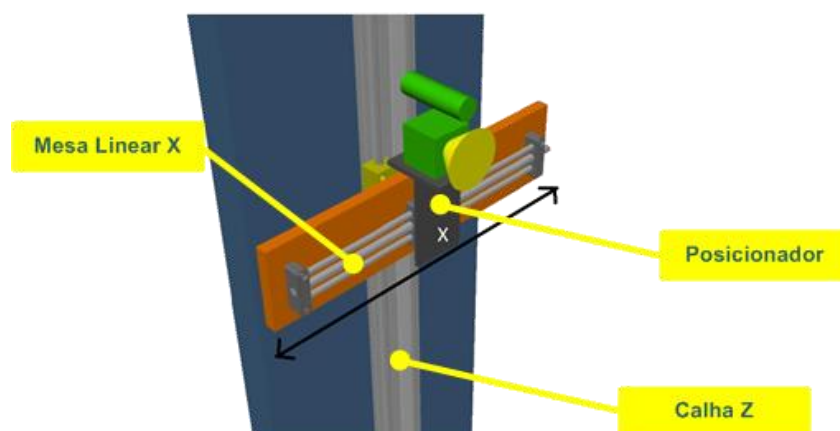


Figura 22 - Protótipo do posicionador X/Z.

O dimensionamento da estrutura horizontal, teve como principal factor a velocidade de deslocamento linear, isto porque, um dos objectivos/requisitos é que o sistema posicione o conjunto de instrumentos na direcção X antes de atingir a cota Z desse ponto.

Estabelecido como requisito que o sistema deveria deslocar-se, na vertical, 1m em 30s, o posicionador X terá de posicionar-se com uma velocidade superior à de Z.

Considerando a velocidade de Z de 30 mm/s, com um motor a rodar a 1rev/s, teríamos de ter um passo no parafuso de uma mesa linear de 30 mm, para X ter a mesma velocidade de Z (assumindo a mesma velocidade de rotação para os dois motores). Este valor de passo tornou-se o principal parâmetro de pesquisa da mesa linear X, já que com uma velocidade maior em X do que em Z conseguiríamos posicionar primeiro o X do que o Z, como pretendido.

A pesquisa das calhas e mesas lineares, foi feita maioritariamente na internet, através dos *sites* dos principais fabricantes, SKF, IGUS, etc.

O fabricante IGUS oferece uma vasta gama de calhas de posicionamento para ambientes industriais, sem necessidade de lubrificação e manutenção reduzida ^[10].

A propriedade mais importante da mesa linear X tem de cumprir, é a velocidade e capacidade de transporte horizontal de um peso de 1 Kg. A mesa linear seleccionada foi o modelo **SHTS – Rápido**, da gama **DryLin IGUS**. Esta permite deslocamentos muito rápidos, já que tem um passo no fuso central de 50 mm, ou seja, cada revolução no fuso corresponde a um movimento linear do posicionador de 50 mm.



Figura 23 – Modelo da mesa linear para a direcção X. SHTS-Rápido.

Esta mesa linear é construída em duralumínio anodizado, as superfícies de contacto entre a parte móvel e o fuso são de Teflon, por isso não necessita de lubrificação. As características técnicas são apresentadas na tabela e figura seguintes:

Tabela 3 - Especificações técnicas da mesa linear SHTS-Rápido.

Modelo	Peso Mín. [Kg]	Peso de 100mm de curso [Kg]	Comprimento máximo do curso [mm]	Passo [mm]	Carga Axial máx. [N]	Carga Radial máx. [N]	Max. Velocidade [m/s]
SHTS-Rápido	0,7	0,1	400	50	700	2800	1

Acionamento binário [Nm]

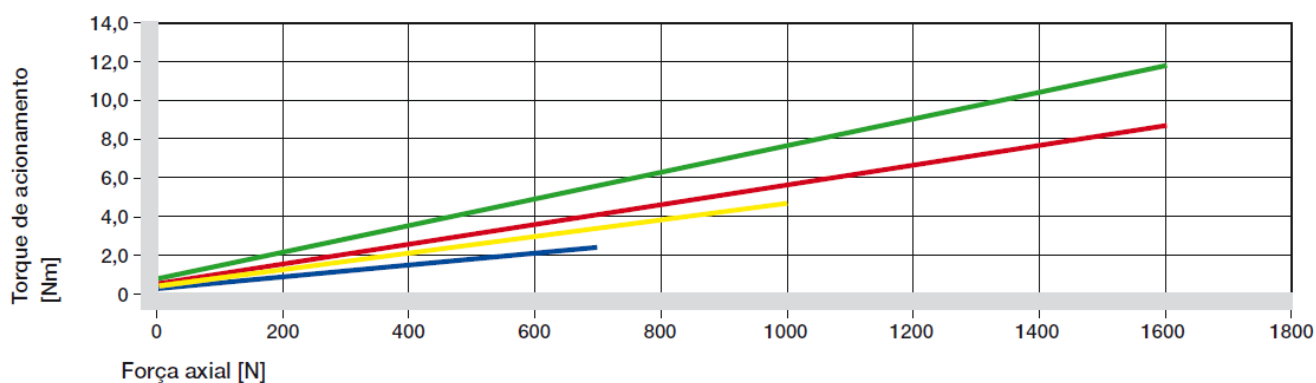


Figura 24- A linha azul representa a o torque necessário para mover uma força axial na mesa linear SHTS.

Max. avanço [m/min.]

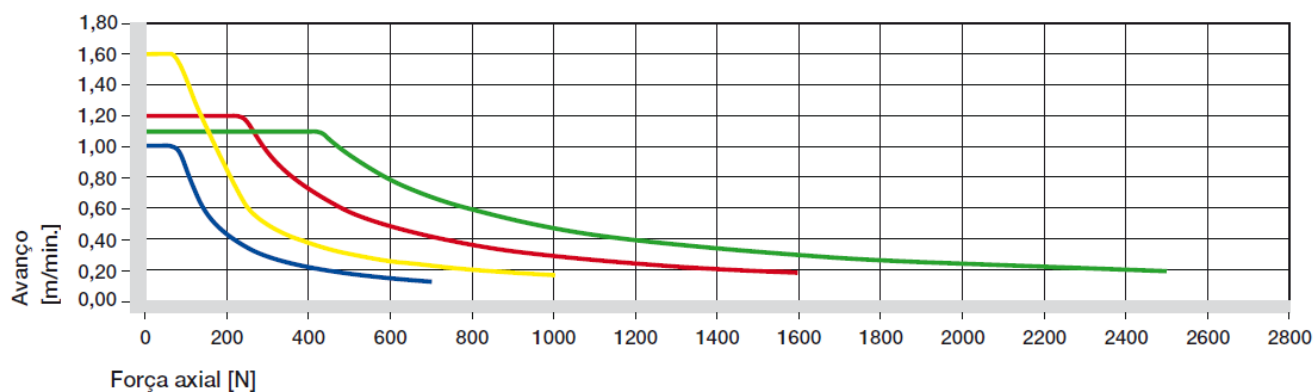


Figura 25 - A linha azul representa a velocidade máxima VS força axial da mesa linear SHTS.

Considerou-se que o conjunto de instrumentos a colocar no posicionador X não deveria ultrapassar 1 Kg, de peso. Observando o gráfico da figura 24 conclui-se que a mesa linear está perfeitamente dentro dos limites em termos de força axial.

O peso estimado da mesa linear X é de aproximadamente 1 Kg. Considera-se que o peso máximo do conjunto, mesa linear + peças de suporte e acoplamento + instrumentos de detecção, não deverá ultrapassar os 5 Kg (este peso foi definido como sendo uma aproximação por excesso, de todo o estágio horizontal).

Definida a estrutura X de posicionamento, procedeu-se à selecção do posicionador em Z.

A calha Z tinha como principal requisito a dimensão e resistência, 2 metros de altura, com capacidade de suportar e içar um peso de 5 Kg, seleccionou-se a gama **DryLin ZLW** – Módulo linear, mais precisamente, o modelo, **ZLW – 1040 – 02** com 2000 mm de comprimento.



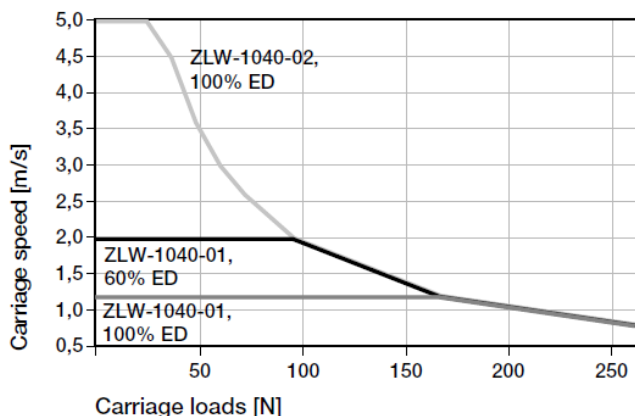
Figura 26 – Calha seleccionada para posicionamento em Z, modelo: DryLin ZLW-1040-02 com 2000 mm de comprimento.

Esta calha é construída em duralumínio anodizado, com uma correia dentada em polilutero e cabos de aço no interior. Possui uma relação de transmissão entre o veio e a correia de 70 mm/revolução. As características técnicas são apresentadas na tabela e figura seguintes:

Tabela 4 - Especificações técnicas da calha ZLW-1040-02

Modelo	Peso Mín. [Kg]	Peso de 100mm de curso [Kg]	Comprimento máximo do curso [mm]	Transmissão [mm]	Tensão correia [200 N]	Largura correia [mm]	Max. Carga radial [N]	Max. Velocidade [m/s]
ZLW-1040-02	1	0,14	2500	70	200	16	300	5

Maximum load ZLW-1040, versions 1 and 2



Required drive torque Vertical installation position – ZLW-1040, version 2

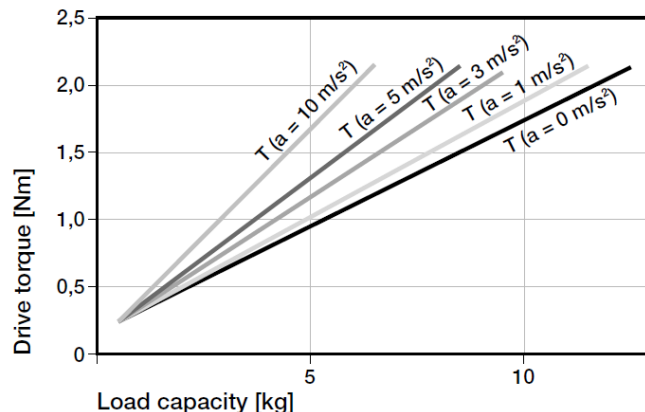


Figura 27 - Velocidade VS carga. Torque VS peso.

Observando os gráficos anteriores, conclui-se que esta calha tem capacidade elevação para a carga considerada, 5 Kg.

2.3) Motores seleccionados

Analisando o gráfico da figura 27, podemos concluir que o motor a ser acoplado à calha Z tem de ter um torque mínimo de aproximadamente **1 Nm**, para uma aceleração de 1m/s^2 . Existem diversos fabricantes de motores passo a passo, quase todos têm bastante informação disponível *on-line* na internet. A selecção fez-se através dos *sites* dos diferentes fabricantes. O fabricante seleccionado foi a **Lin Engineering™** [9].

Para movimentar o posicionador na direcção Z, escolheu-se o motor **5709L-01P**, trata-se de um motor híbrido, 0.9° de passo, bipolar e de dimensão NEMA 23. As características técnicas podem ser consultadas na tabela 5 e na figura 28, o desenho técnico encontra-se no anexo O.

Tabela 5 - Especificações técnicas do motor 5709L-01P.

Modelo	Dimensão	Ampere/fase	Torque	Resistência	Indutância	Peso	Condutores
5709L-01P	78.2 mm	2.8 A	1.86 Nm	1.1 Ω	3.8 mH	997 g	4

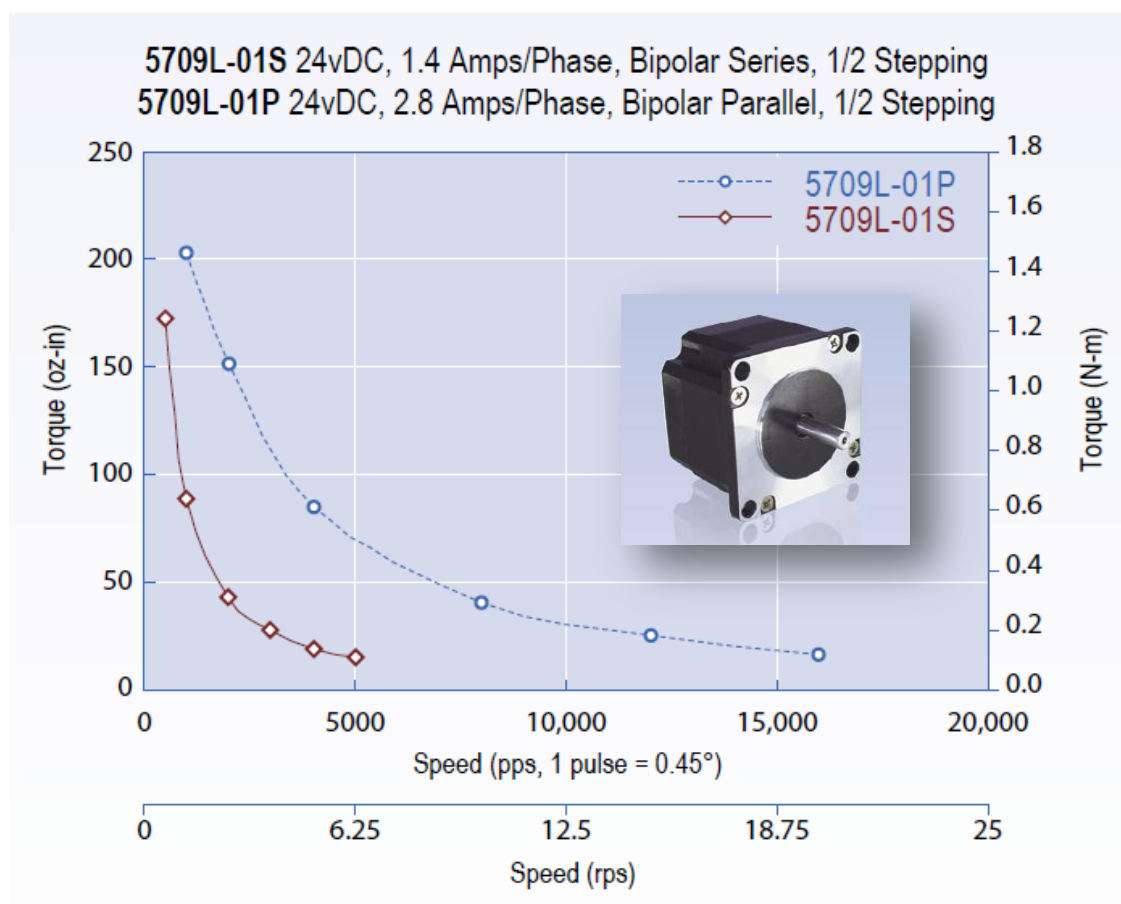


Figura 28 - Gráfico do torque em função da velocidade do motor 5709L-01P.

Para movimentar o sistema na direcção X, escolheu-se o motor **4209L-01P**, trata-se de um motor híbrido, 0.9° de passo, bipolar e de dimensão NEMA 17. As características técnicas podem ser consultadas na tabela 6 e na figura 29, o desenho técnico encontra-se no anexo O

Tabela 6- Especificações técnicas do motor 4209L-01P.

Modelo	Dimensão	Ampere/fase	Torque	Resistência	Indutância	Peso	Condutores
4209L-01P	48 mm	1.7 A	0.44 Nm	1.9 Ω	5.3 mH	318 g	4

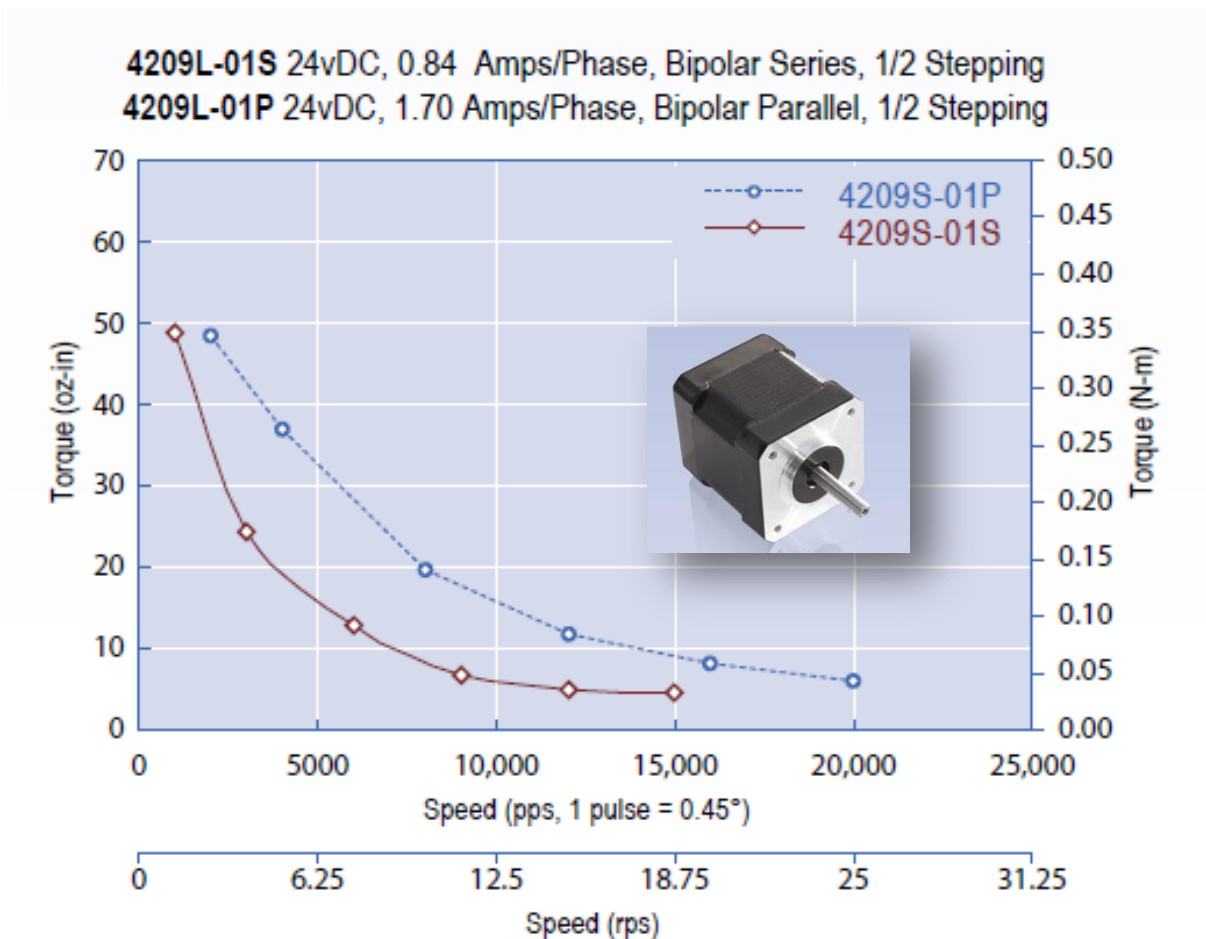


Figura 29 - Gráfico do torque em função da velocidade do motor 4209L-01P.

Ao motor Z foi adicionado uma caixa redutora de 7:1, ou seja, cada 7 voltas do veio do motor corresponde apenas uma no veio da caixa redutora. Conseguiu-se assim aumentar o torque disponível, a resolução do posicionamento e suavizar o movimento do posicionador Z.

Como a calha Z tem um deslocamento linear de 70 mm por revolução do veio, a caixa redutora permite manter a rotação suave do motor mesmo para velocidades mais baixas. Para essas velocidades mais baixas, o motor irá trabalhar em rotações mais altas e portanto o sistema terá menos vibração, ao contrário do que se estivesse directamente acoplado ao veio do motor e este tivesse de trabalhar em rotações mais baixas, acentuando a vibração devido aos passos do motor ^[9].



Figura 30 - Caixa redutora 7:1, modelo PM23.

2.4) Resolução

Ambos os motores têm um passo de 0.9° , portanto uma resolução de 400 passos por revolução (ver tabela 1), assumindo o modo de funcionamento, *Full-step*. O sistema terá uma resolução no posicionamento definida por:

$$R = \frac{L_{360^\circ}}{P_{rev}} ;$$

em que R é a resolução do posicionador em μm , L_{360° é o deslocamento linear em μm do posicionador da calha por revolução completa (360°), e finalmente, P_{rev} é o número de passos para produzir uma revolução completa de 360° .

Assim,

Tabela 7 - Resolução no posicionamento na direcção Z e X.

Direcção	L_{360°	P_{rev}	R
Z	70 000 μm	400 x 7	25 μm
X	50 000 μm	400	125 μm

Na direcção Z, a caixa redutora de 7:1 permite aumentar a resolução do posicionamento.

2.5) Driver

Tendo em conta o melhor desempenho dos motores, optou-se por utilizar o driver sugerido pelo fabricante dos motores (ver figura 31). O driver seleccionado é do tipo bipolar *chopper*^[9].



Figura 31 - Driver R325 da Lin Engineering.

O **Driver R325 da Lin Engineering™**, possui as seguintes características:

- Tensão de alimentação entre +15V e +48V DC.
- Corrente de fase do enrolamento entre 0.3A e 3A de pico.
- Resolução do passo entre “Full-step” e “256 - microstepping”.
- Corrente de retenção configurável.
- “Pole Damping Technology”.

Pole Damping Technology™

Esta característica do driver R325, melhora a performance dos motores e a sua suavidade na rotação. Em cada passo a corrente é controlada de modo a evitar o efeito “amortecedor”, existente quando o rotor do motor é alinhado com o enrolamento do estator^[9].

Tabela 8 - Ligações eléctricas do driver R325

Ligações eléctricas do Driver R325		
Pino	Função	Descrição
1	+ 5V Comum	Entrada dos 5V de referência do gerador de sinal do step.
2	Step (IN)	Entrada do impulso que vai gerar os passos do motor.
3	Direction (IN)	Direcção de rotação do motor.
4	+5V DC Internal	Saída de 5V do driver.
5	Disable (IN)	Entrada para desactivar o driver.
6	Motor A+ (OUT)	Saída para a enrolamento A+ do motor.
7	Motor A- (OUT)	Saída para a enrolamento A- do motor.
8	Motor B+ (OUT)	Saída para a enrolamento B+ do motor.
9	Motor B- (OUT)	Saída para a enrolamento B- do motor.
10	N.C.	Só utilizado no modelo R325i.
11	Power GND	Entrada de alimentação massa ou ground.
12	Power Positive	Entrada positiva da fonte de alimentação 24V DC.

O *driver* possui um *DIP Switch* que permite configurar alguns parâmetros. Esses parâmetros são, a corrente máxima de funcionamento (run), a corrente máxima de retenção (hold) e a resolução dos passos (*Full-step*, *half-step*, *microstepping*). A tabela seguinte apresenta uma dessas configurações possíveis (apenas para a resolução do passo), a tabela completa de configurações encontra-se em anexo.

Tabela 9- Configuração da resolução do Passo.

Resolução	SW7	SW8	SW9	SW10
Full step	OFF	OFF	OFF	OFF
Half step	ON	OFF	OFF	OFF
4 x	ON	ON	OFF	OFF
8 x	ON	OFF	ON	OFF
16 x	ON	ON	ON	OFF
32 x	ON	OFF	OFF	ON
64 x	ON	ON	OFF	ON
128 x	ON	OFF	ON	ON
256 x	ON	ON	ON	ON

2.6) Fins de curso

Os detectores de fim de curso são cruciais no desenvolvimento do sistema, estes vão permitir ao microcontrolador detectar que o posicionador chegou a um limite de deslocamento. Dado o elevado torque dos motores, é essencial que os fins de curso sejam fiáveis e precisos, para não existirem falhas e avarias mecânicas no sistema.

Foram utilizados interruptores ópticos do tipo foto-transístor para detectar a presença do posicionador em movimento, tanto para a direcção X como para a Z.

O interruptor óptico utilizado é o modelo **EE-SA105** do fabricante **OMRON** ^[12].

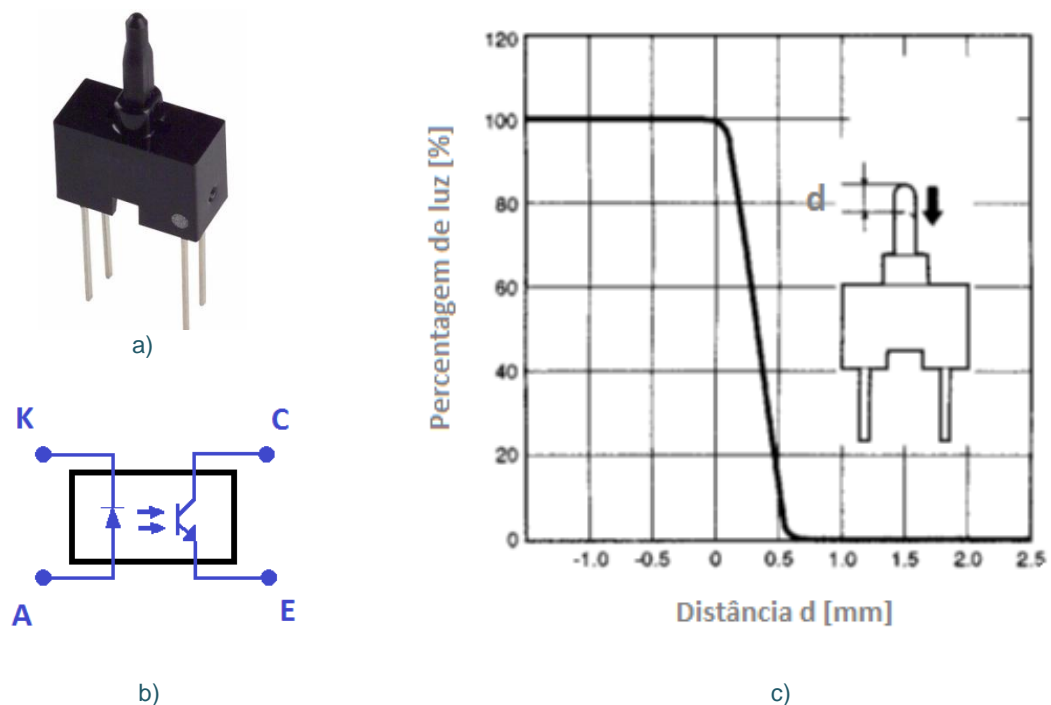


Figura 32 – a) Aspecto do Interruptor Óptico EE-SA105. b) Circuito interno do EE-SA105.

c) Intensidade Luminosa do LED em função da posição do pino do interruptor.

Foi desenhado um circuito electrónico para permitir que com o interruptor livre estejam +5V à saída do sinal, e com o interruptor pressionado estejam 0V na mesma saída, (ver Figura 33).

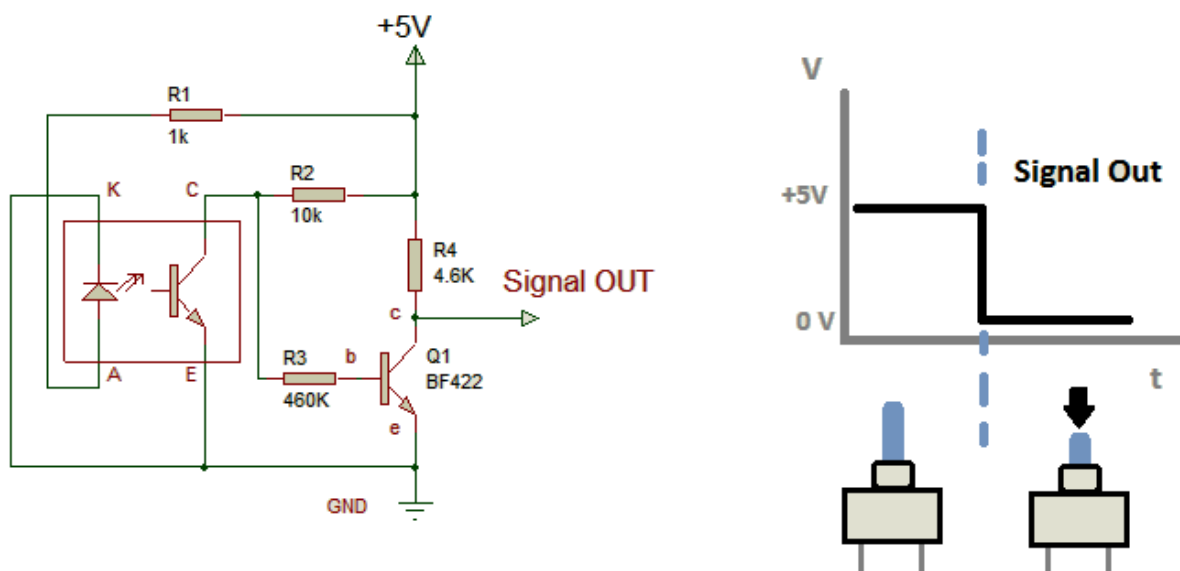


Figura 33 – Esquema do circuito dos detectores de fim de curso.

Quando o interruptor é accionado por pressão, interrompe um feixe de luz e o transístor do interruptor corta a corrente entre o colector e a base, assim, na base do transístor Q1 aparece uma corrente, esta faz polarizar o transístor. À saída **Signal OUT** onde estavam +5V passam a estar 0V.



Figura 34 - Pormenor do circuito do fim de curso implementado no sistema final.

Instalaram-se quatro detectores de fim de curso, X – esquerda, X – direita, Z – topo, Z – baixo.

2.7) Desenho das peças e montagem dos componentes mecânicos

O acoplamento físico entre os veios dos motores e os veios, da calha Z e da mesa linear X, criou a necessidade da projecção e construção de um conjunto de peças. O suporte/acoplamento entre a mesa linear X e o posicionador da calha Z, bem como os suportes dos motores, também foram desenhados e construídos.

Neste capítulo iremos abordar as soluções encontradas. Os desenhos técnicos encontram-se no anexo a esta dissertação.

2.7.1) Acoplamentos

O motor X tem um veio de diâmetro 5 mm, este veio tem de acoplar com o veio da mesa linear X, cujo diâmetro é de 10 mm. Para a união utilizou-se um acoplador com o modelo **207P27.3232.F** do fabricante **HUCO™**, como este acoplador tem um diâmetro interno de 10 mm nos dois lados, desenhou-se uma peça de enchimento para acoplar do lado do veio do motor.

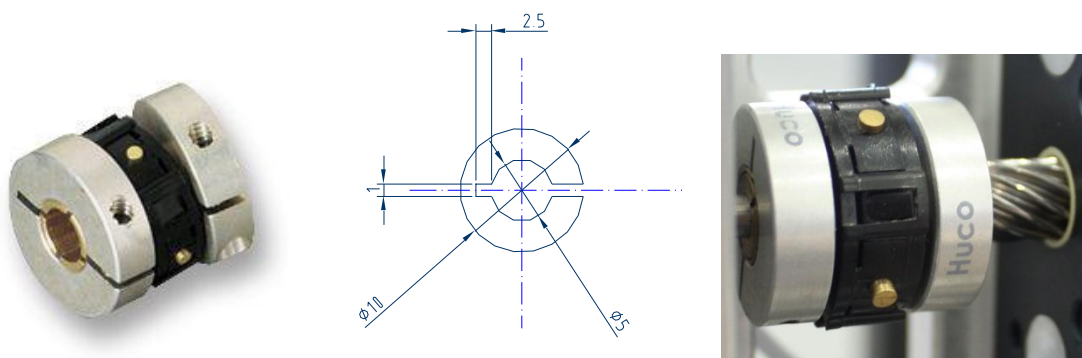


Figura 35 - Acoplamento HUCO (10mm x 10mm). Peça de enchimento (5mm x 10mm). Fotografia da instalação final, pode observar-se o acoplamento HUCO + peça de enchimento instalados.

Para o motor Z procedeu-se de igual modo, desta vez utilizou-se o modelo **206.34.3232** (10mm x 10 mm) também da **HUCO™**. Este acoplamento suporta mais binário do que o modelo usado no acoplamento X. Desenhou-se um adaptador para a união entre o veio do motor Z e o veio da calha Z.

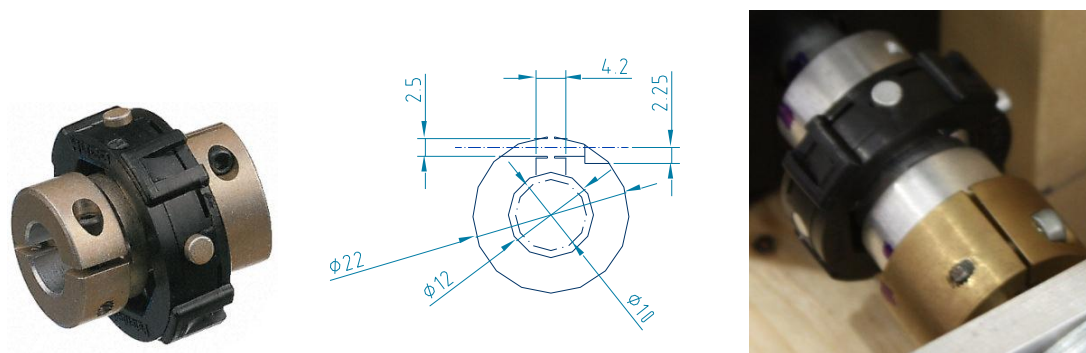


Figura 36 - Acoplamento HUCO (10mm x 10mm). Peça de adaptação do tipo de veio. Fotografia da instalação final, pode observar-se o acoplamento HUCO + peça de adaptação, instalados nos veios.

2.7.2) Suportes

Para suportar a mesa linear X, suportar o motor X e criar uma base de sustentação para o conjunto Iluminação, laser e camara, procedeu-se ao desenho das seguintes peças:

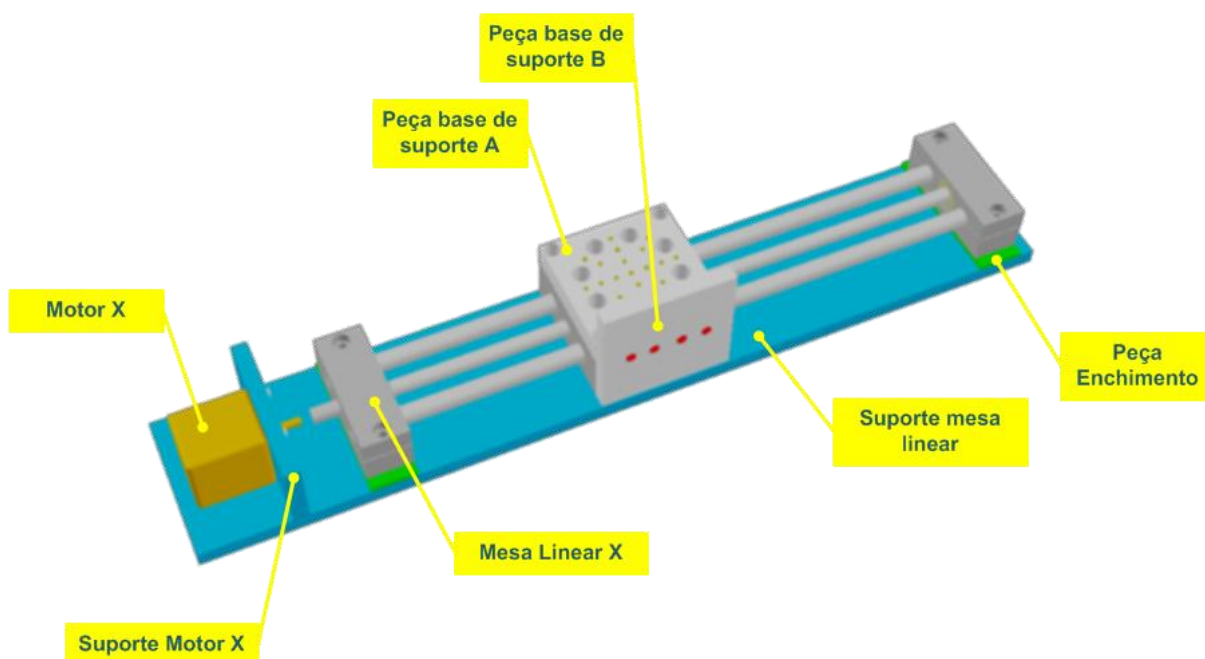


Figura 37 - Esquema do desenho das peças de suporte dos componentes X.

A peça de enchimento representada a verde na figura 37 foi necessária para existir um correcto alinhamento, entre o veio do motor X e o veio da mesa linear X. A peça base de suporte A e B foram desenhadas de modo a permitir alguma versatilidade na colocação da

iluminação, laser e câmara. Servem também para dar suporte mecânico aos cabos eléctricos que irão acompanhar o posicionador durante o seu movimento.

Todas as peças foram construídas em alumínio.

A figura seguinte ilustra o aspecto final das peças:

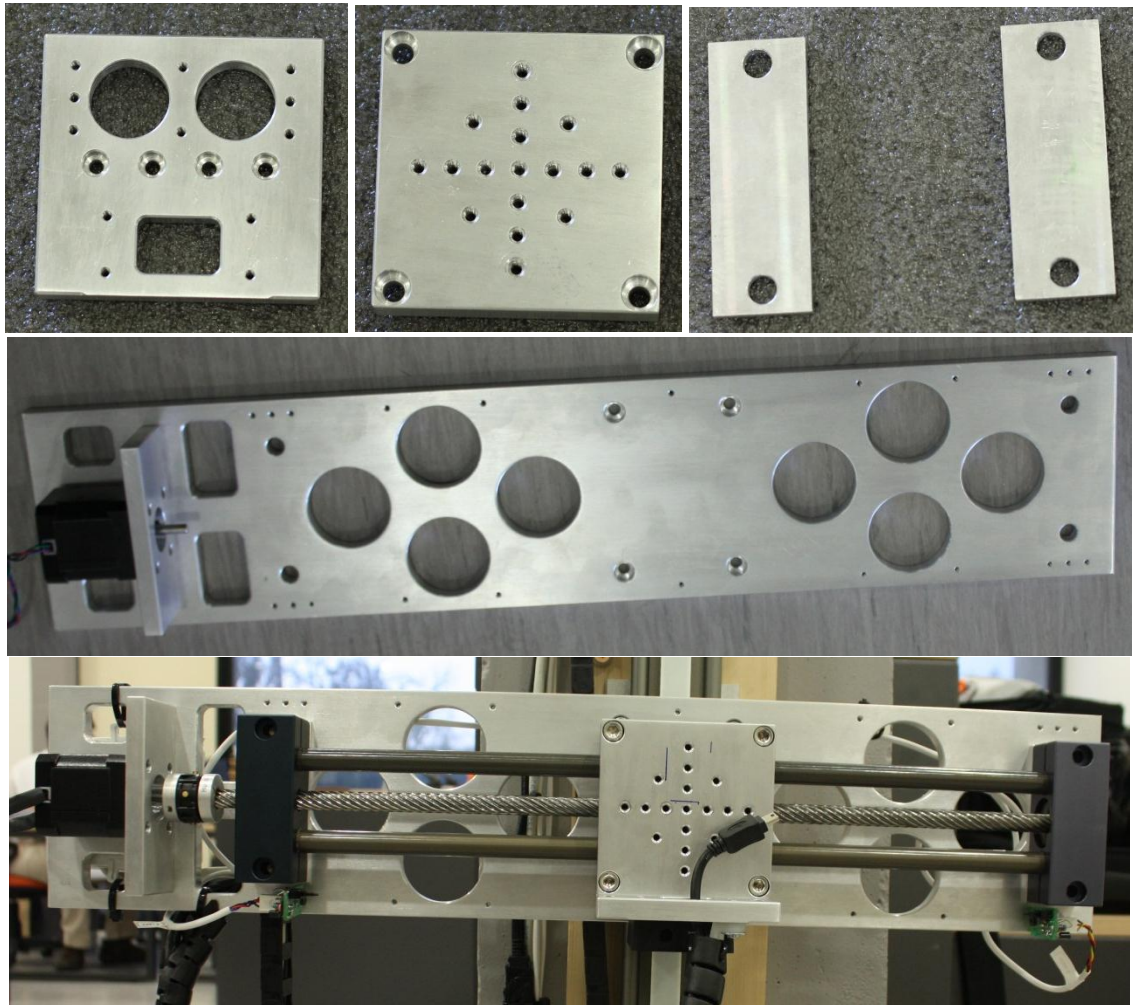


Figura 38 - Vista das várias peças construídas para acoplar os diferentes componentes.

Os desenhos técnicos de todas as peças aqui representadas, encontram-se no anexo O.

A figura seguinte ilustra o sistema final, com todos os componentes instalados.

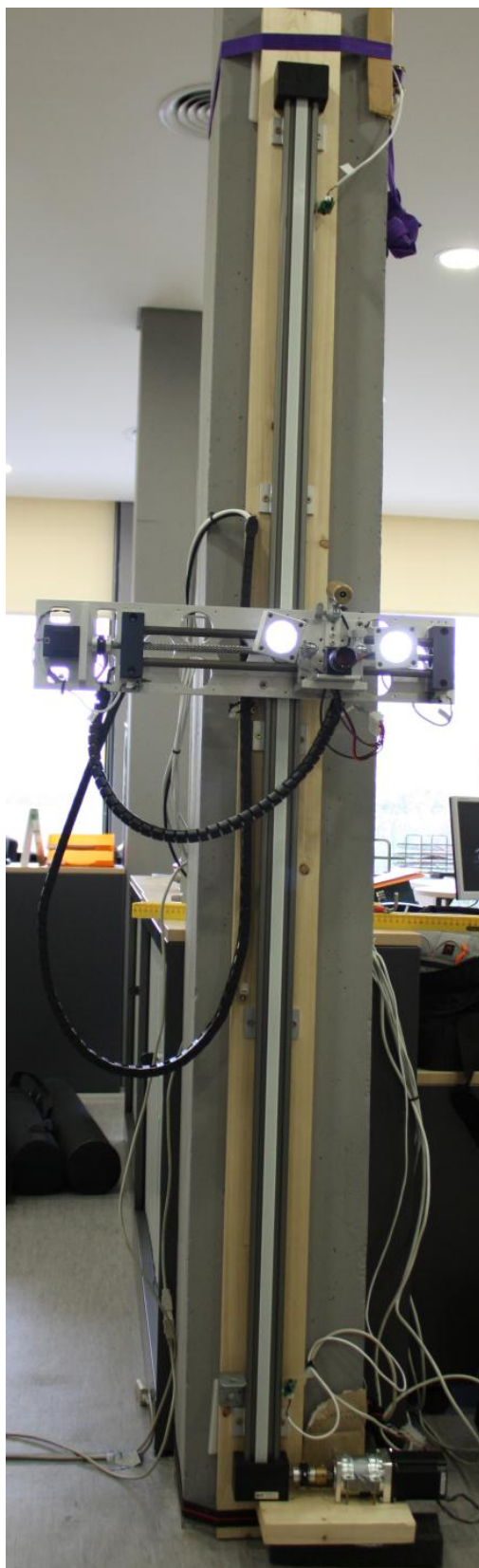


Figura 39 - Aspecto do Métrica Vertebral - Automático.

3) DESENVOLVIMENTO da electrónica de controlo

O desenvolvimento da electrónica teve como componente central o microcontrolador.

As funções do microcontrolador são:

- Gerar os impulsos eléctricos para os drivers dos motores.
- Controlar a posição do posicionador.
- Monitorizar os sinais dos fins de curso e do interruptor de emergência.
- Controlar o driver dos relés, permitindo ligar/desligar a iluminação e o laser.
- Controlar o LCD e os LEDs.
- Gerir as comunicações RS232 da porta série.
- Guardar na EEPROM as posições de “*Home Position*” e posições da aquisição no eixo Z e X.

Projectou-se o circuito electrónico com base no seguinte esquema:

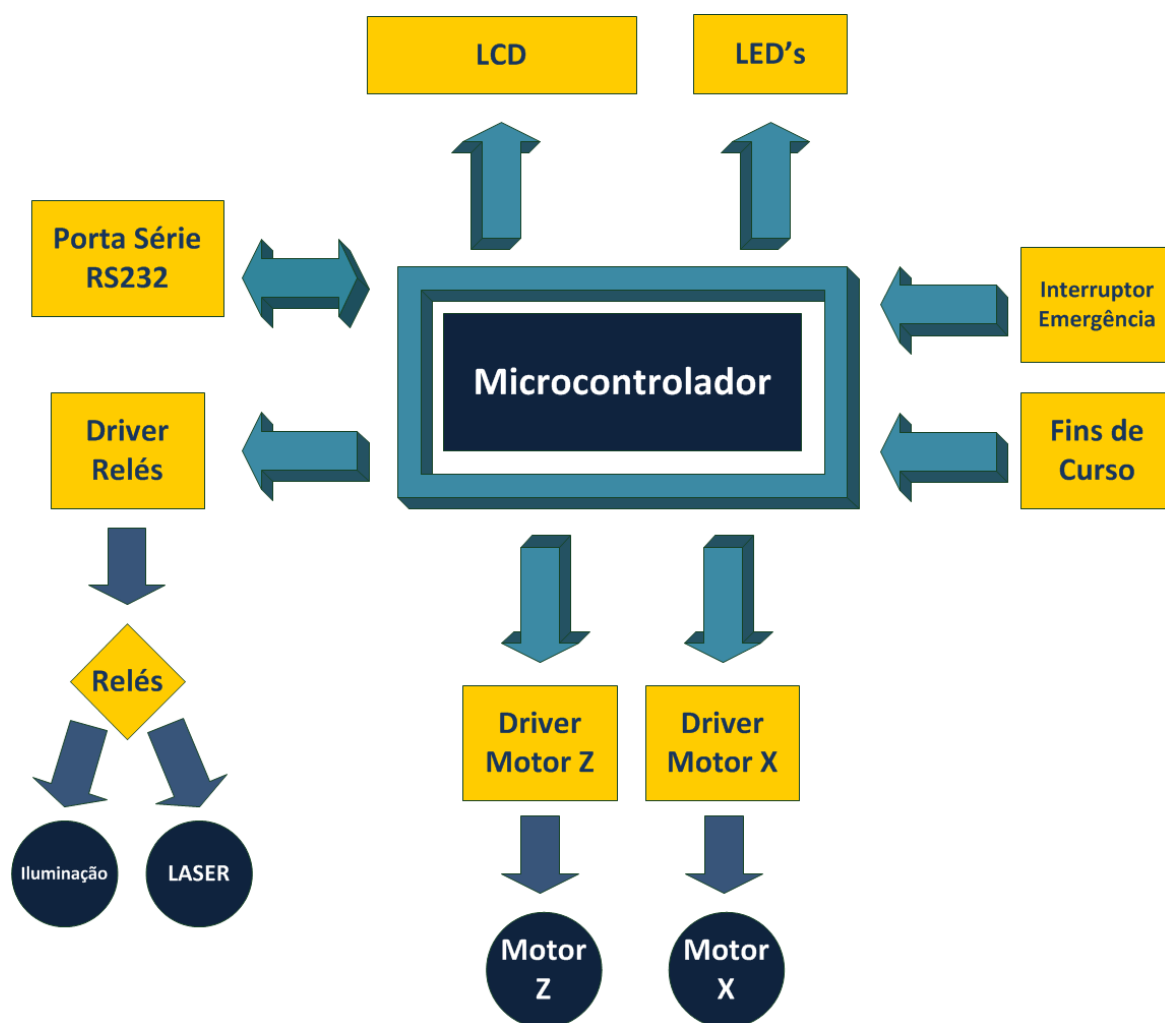


Figura 40 - Diagrama da electrónica de controlo.

3.1) Microcontrolador

A função principal do microcontrolador é gerar os impulsos eléctricos (Clock) para fazer rodar os motores, ao mesmo tempo que controla a posição actual do posicionador. É responsável ainda por monitorizar os fins de curso, o interruptor de emergência, controlar o estado dos relés e gerir a comunicação série RS232 com o computador.

Na selecção do microcontrolador teve-se em consideração os seguintes requisitos mínimos:

- Cada driver dos motores precisa de ser controlado por 3 portos digitais (*Step; Direction; Disable*), portanto 6 portos digitais disponíveis para os dois *drivers* dos motores.
- Pelo menos 2 portos digitais para controlar os relés do laser e da iluminação.
- 4 portos digitais para os fins de curso, mais 1 para o interruptor de emergência.
- Um porto de *input* para *interrupt* via *hardware*.
- O LCD precisa de 7 portos digitais disponíveis no microcontrolador.
- Pelo menos 3 portos digitais para controlo de LEDs.
- Necessita ter USART (módulo de comunicação série RS232).
- Pelo menos 3 Timers internos programáveis.
- EEPROM com mínimo de 200 bytes.

Tabela 10 - Requisitos mínimos para a selecção do microcontrolador.

Microcontrolador	
Portos I/O Digitais	23
Comunicação série RS232	USART
Timers internos	3
Interrupt por hardware	1
EEPROM	200 Bytes

Devido à facilidade e versatilidade de implementação da família 16F de microcontroladores PIC da Microchip™, seleccionou-se o microcontrolador **16F877A**.

Este microcontrolador possui 3 timers internos programáveis, 14.3 Kbytes de memória programável, 368 bytes para variáveis de código, 256 bytes de EEPROM, bem como 33 pinos de input/output igualmente configuráveis ^[13].

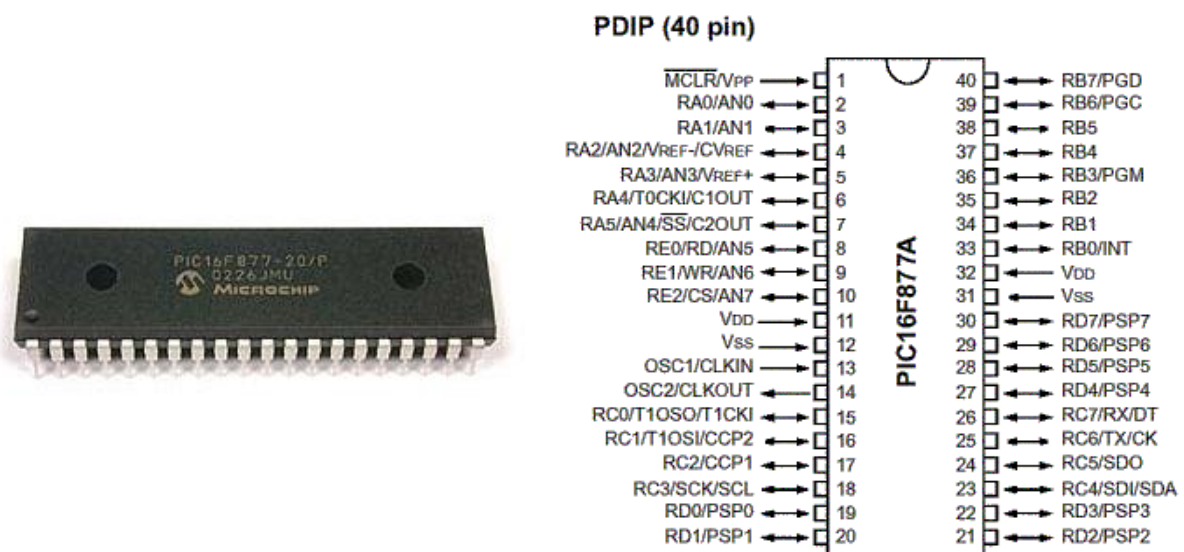


Figura 41 - Microcontrolador PIC 16F877A.

Tabela 11 - Características técnicas do microcontrolador 16F877A.

PIC 16F877A			
Memória Programa	14.3 K	CCP	2
Nº de Instruções	8192	SPI	Sim
Data RAM	368	I2C	Sim
EEPROM	256	USART	Sim
I/O Ports	33	Timers 8/16 bit	2/1
10 bit ADC	8	Comparadores	2

O PIC 16F877A está disponível em formato 40 pinos DIP, ou seja, a sua integração em circuito impresso, é bastante facilitada.

3.2) Oscilador

O oscilador utilizado foi um cristal do tipo IC do fabricante *EPSON™*, com uma frequência de relógio de 16 MHz. Este oscilador é de fácil implementação já que se integra facilmente na lógica TTL. Na Tabela 12 pode observar-se o seu diagrama de pinos.



Tabela 12 - Pinos do Oscilador.

Pino	Descrição
1	Disable
4	GND
5	Oscilator OUT
8	Vcc / +5V

3.3) Ficha de programação

A ficha de programação permite estabelecer uma comunicação entre o computador e o microcontrolador, para se executar a programação deste. Esta ligação consegue-se através do *debugger* MPLAD ICD2 (capítulo 4).

O circuito electrónico é o seguinte:

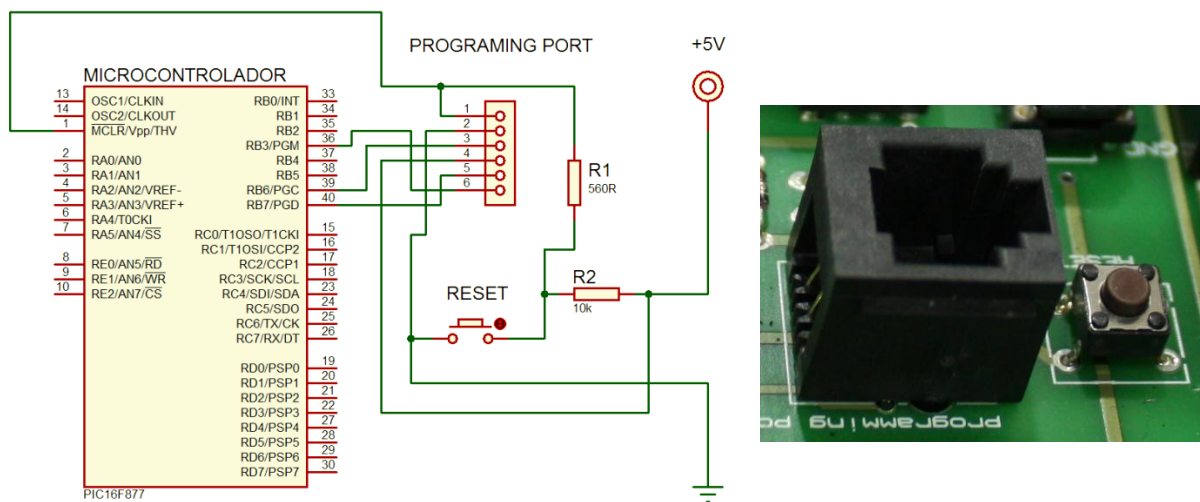


Figura 42- Circuito electrónico da porta de programação. Fotografia da ficha de programação e do interruptor de *reset* implementados no circuito impresso.

Existe também implementado no circuito, um interruptor de *reset*. Este permite reinicializar o microcontrolador sem ser necessário interromper a alimentação do sistema.

A ficha de programação é do tipo **RJ11 6/6**. Na tabela seguinte podemos consultar as ligações nesta ficha.

Tabela 13 - Ligações na ficha de programação.

Função /Pino PIC	MCLR / 1	GND	PGC / 39	+5V	PGD / 40	PGM / 36
Ficha de Programação	1	2	3	4	5	6

3.4) Comunicação Série RS232

O conceito de comunicação série é simples, a porta série envia e recebe bits, um de cada vez, até fazer um byte de informação. Apesar da comunicação série ser mais lenta do que a paralela, em que um byte é enviado de uma só vez, a comunicação série permite comunicar com dispositivos até 1000 m de distância (para velocidades lentas, *baud rate* 2100).

Tipicamente a porta série é utilizada para transmissão/recepção de dados no formato ASCII. A comunicação é assegurada utilizando três linhas, TX (Transmit Data), RX (Receive Data) e GND (Ground). Trata-se de uma comunicação assíncrona, assim, é necessário haver entre dois dispositivos a mesma configuração de alguns parâmetros importantes: *Baud Rate*, *Data bits*, *Start bit*, *Stop bit* e bit de Paridade. ^[14]

- **Baud Rate** – Taxa ou velocidade de transmissão. Indica o número de bits transmitidos por segundo, por exemplo, 9600 baud indica que são enviados 9600 bits por segundo, ou 1200 bytes/s. As velocidades típicas indicadas no documento “*The RS232 Standart*” são: 300, 1200, 2400, 9600 e 19200 baud.
- **Data bits** – Indica o número de bits necessários para formar um pacote de dados. Para enviar um byte são precisos 8 bits, no entanto pode ser enviado 5 ou 7 bits apenas no caso de não serem necessários todos os bits de um byte.
- **Start bit** – Indica o início de uma transmissão. Este bit é sempre um zero lógico.
- **Stop bit** – O *stop bit* é utilizado para indicar o final da transmissão de um pacote de dados. Pode ser composto por 1 bit, 1,5 e 2 bits. É ainda utilizado para permitir a

sincronização entre dois dispositivos já que cada um gera o seu próprio clock, ou seja, o seu *Baud rate*.

- **Bit de Paridade** – Consiste numa forma simples de detectar erros na transmissão/recepção de dados. A porta série indica num bit (imediatamente a seguir aos bits de dados), se a transmissão teve um número par/ímpar de 1's lógicos, por exemplo se os dados transmitidos forem: 0010 1000, temos 2 bits a 1 e portanto um número par de 1's lógicos, então o bit de paridade virá a zero lógico. No caso de termos um número ímpar de 1's lógicos o bit de paridade virá a 1.

A figura seguinte exemplifica uma transmissão série assíncrona do valor **0x53h** ou **01010011b**:

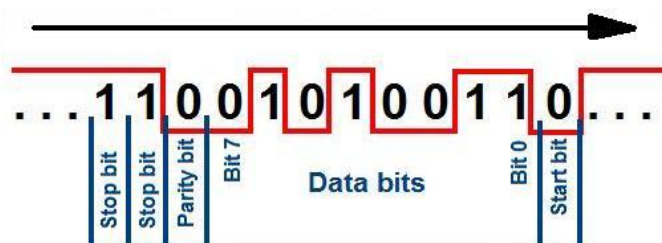


Figura 43 -Exemplo de transmissão série assíncrona, são enviados um start bit, 8 bits de dados, um bit de paridade (neste caso o byte tem quatro 1's lógicos, logo é par e o bit vem a zero) e inicialmente dois stop bits.

Os dispositivos que usam cabos série para as suas comunicações, são divididos em duas categorias distintas, os DCE (Data Communications Equipment) e os DTE (Data Terminal Equipment). Um dispositivo do tipo DTE é o caso de um computador, que funciona como um terminal de comunicações, como exemplo dos DCE temos o caso dos modems, impressoras, etc ^[14].

As especificações eléctricas da porta série podem resumir-se nas mais importantes:

- Um sinal lógico 0 (LOW) situa-se entre os +3V e os +25V.
- Um sinal lógico 1 (HIGH) situa-se entre os -3V e os -25V.
- A região entre os -3V e os +3V é considerada indefinida.
- No caso mais simples a comunicação pode ser feita apenas por três condutores, RX, TX e GND.
- A porta série pode apresentar-se em dois formatos, o formato D9 e o formato D25.

MAX232

Para converter a lógica TTL (0V a +5V) no protocolo RS232, que funciona com tensões entre os -15V e os +15V, é necessário um *driver* de corrente.

O fabricante **MAXIM™** tem disponível no mercado os ICs MAX232. Este integrado faz parte da família dos chamados *drivers/receivers* para aplicações de comunicação série baseadas no protocolo EIA/TIA-232E. Cada IC MAX232 possui dois *drivers* disponíveis, foi utilizado apenas um deles.

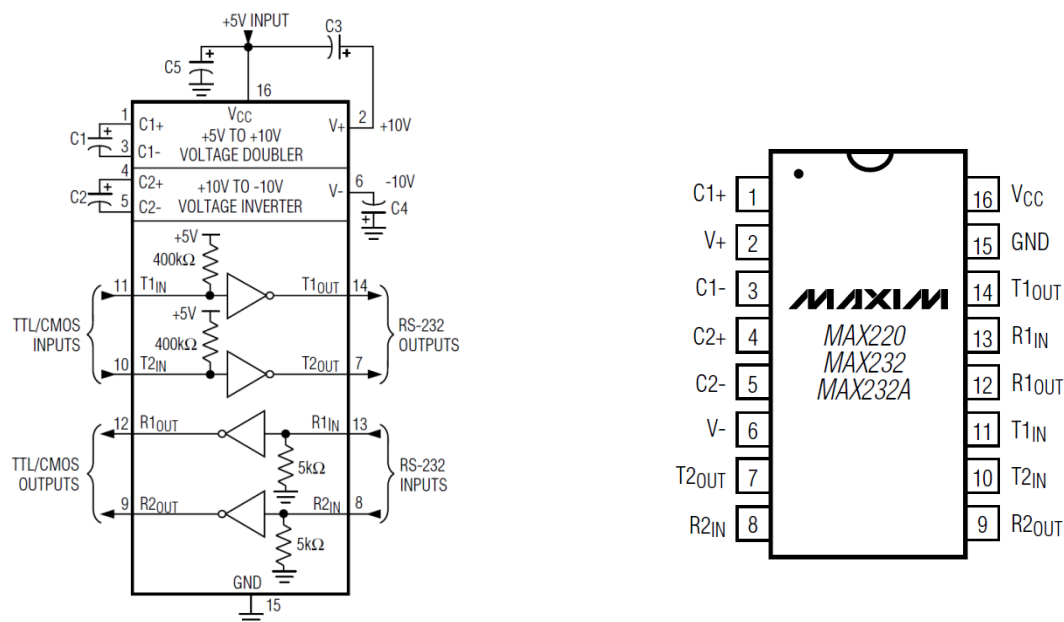


Figura 44 – Diagrama dos pinos do MAX232.

É necessário adicionar alguns condensadores ao MAX232, consultando a tabela fornecida no *datasheet* deste IC, conclui-se que os condensadores necessários são de 1µF.

Na tabela seguinte apresenta-se o esquema de ligação dos pinos do MAX232.

Tabela 14– Ligação dos pinos do MAX232

Pino	Função	Ligação	Pino	Função	Ligação
1	Duplicador de Tensão	C1 +	9	TTL/CMOS Output	R2 OUT
2	Duplicador de Tensão	C3 +	10	TTL/CMOS Input	T2 IN
3	Duplicador de Tensão	C1 –	11	TTL/CMOS Input	T1 IN
4	Inversor	C2 +	12	TTL/CMOS Output	R1 OUT
5	Inversor	C2 –	13	RS232 Input	R1 IN
6	Inversor	C4 –	14	RS232 Output	T1 OUT
7	RS232 Output	T2 OUT	15	Massa/Ground	GND
8	RS232 Input	R2 IN	16	VCC	+ 5V

Tabela 15 - Pinos de ligação PIC - MAX232

Porto PIC	MAX232
RC6 / TX	T1 IN
RC7 / RX	R1 OUT

3.5) Fins de curso

A detecção do sinal dos fins de curso foi feita através do pino de *Interrupt* do microcontrolador. Uma variação do sinal lógico no pino **RB0/INT** é detectada pela rotina de interrupts do microcontrolador.

Foi necessário fazer convergir os quatro sinais dos fins de curso mais o sinal do interruptor de emergência num único pino, o RB0/INT do PIC 16F877A. Para isso utilizou-se o circuito integrado **74LS30** com a função de NAND de 8 portas, ou seja, com os cinco sinais a +5V (HIGH) à saída temos 0V (LOW), se uma entrada ou mais estiverem a 0V (LOW), à saída temos +5V (HIGH) ^[15].

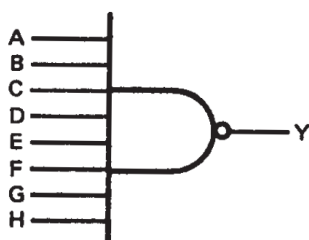


Tabela 16 - Tabela de verdade do 74LS30.

Sinal lógico à entrada	Sinal lógico à saída
Pinos A a H em HIGH (+5V)	LOW (0V)
Um ou mais em LOW (0V)	HIGH (+5V)

Um interruptor de fim de curso ou emergência ao ser accionado faz com que à saída Y do 74LS30 esteja o sinal lógico HIGH. Desta forma, o circuito ao ser alimentado com os fins de curso não pressionados, teremos LOW à entrada do porto RB0/INT do PIC. Este estado LOW não permite distinguir entre ausência de pressão dos fins de curso ou avaria por exemplo no 74LS30, assim, colocou-se um inversor lógico entre a saída do 74LS30 e a entrada de interrupt RB0/INT do PIC. Desta forma, o circuito ao ser alimentado tem de ter à no porto RB0/INT o estado HIGH, quando um interruptor de fim de curso é pressionado, temos à entrada do porto RB0/INT o sinal lógico LOW. É esta variação de sinal que é detectada pelo interrupt de hardware do PIC.

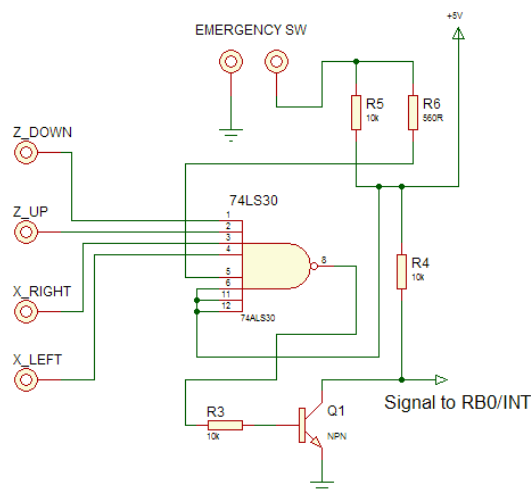


Figura 45 - Circuito 74LS30 com inversor lógico.

Cada um dos sinais dos fins de curso e do interruptor de emergência está ligado a um dos portos do PIC, deste modo quando for detectado o *interrupt*, é possível saber qual foi o interruptor pressionado através do estado dos portos correspondentes, essa correspondência encontra-se na tabela 17.

Tabela 17 - Portos de endereçamento dos fins de curso.

Interruptor	Porto PIC
Z_DOWN	RB1
Z_UP	RB2
X_RIGHT	RB5
X_LEFT	RB4
Interruptor Emergência	RE0

3.6) Drivers motores (controle)

Os drivers R325 têm como entradas os 3 sinais de controlo do motor, os impulsos de passo (*step*), a direcção de rotação do motor (*direction*) e um controlo para cortar a alimentação ao motor (*disable*). Foram seleccionados portos no microcontrolador para controlar as três entradas. O driver possui ainda uma entrada de referência da tensão que gera o sinal lógico do *step*, assim, disponibilizou-se uma saída dos +5V do circuito para ligar a este terminal do driver.

A tabela 18 identifica os pinos associados ao controlo dos drivers dos motores.

Tabela 18 - Ligações entre o PIC e os *drivers* R325.

Driver Z	Porto PIC	Driver X	Porto PIC
Step Z	RA2	Step X	RA3
Direction Z	RA1	Direction X	RA4
Disable Z	RA0	Disable X	RA5

Aos portos RA2 e RA3 responsáveis pelos impulsos dos passos, foram adicionadas resistências de *pull-up* no valor de 10KΩ. Estas resistências garantem que o sinal lógico HIGH (+5V) se mantém acima de 2 V (fronteira entre o sinal lógico HIGH e LOW).

3.7) Relés

Utilizaram-se relés para controlar o estado do laser e da iluminação, estes podem ser ligados ou desligados através de comandos ao microcontrolador.

O relé seleccionado foi o modelo **G5LE** do fabricante **OMRON**™. Estes relés podem ser implementados directamente no circuito impresso e as suas bobinas funcionam com tensões baixas, apenas +5V DC.

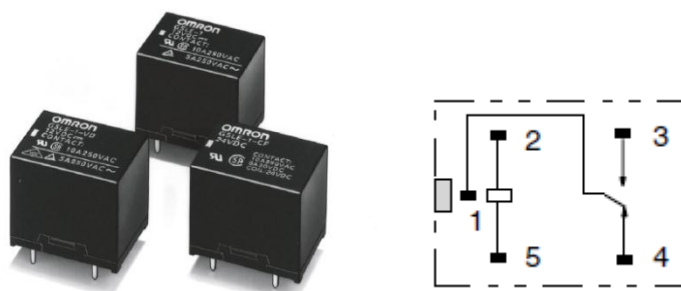


Figura 46 - Relé G5LE. Circuito interno.

No entanto segundo o *datasheet* do fabricante, a potência de consumo da bobina é de 400mW, ou seja, cerca de 80 mA de corrente a 5V. Um porto do PIC 16F877A só disponibiliza no máximo 25mA de corrente de saída.

Utilizou-se um driver para alimentar os relés do circuito. O driver seleccionado foi o **UDN2981A** do fabricante **Allegro**™. Este driver disponibiliza nas suas saídas correntes até 500mA, e tem como tensão de funcionamento mínima de +5V DC. A figura 47 exemplifica o pin-out do circuito integrado.

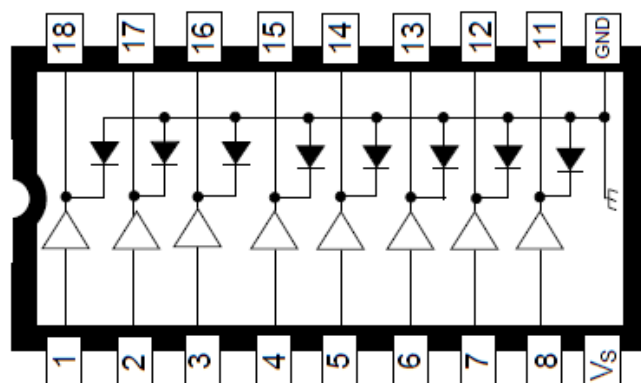


Figura 47 - Pin-out do UDN2981A.

Dado que o UDN2981A tem 8 portas disponíveis, utilizaram-se 4 portas para controlar 4 relés. Um relé para a iluminação, um para o laser e dois extra para futuras utilizações. As ligações podem ser consultadas na tabela 19.

Tabela 19 - Ligações PIC -> UDN2981 -> Relés

Porto PIC	Pino do UDN2981A	Relé
RC3	1	0 (Iluminação)
RC2	2	1 (laser)
RC1	3	2 (reserva)
RC0	4	3 (reserva)

3.8) LED's

Foram reservados três pinos do microcontrolador para controlo de LED's. Os LED's são importantes para informação visual do comportamento do sistema. Assim, definiram-se três LED's de informação, ver tabela 20:

Tabela 20 - Ligações e função dos LEDs.

Pino PIC	LED	Cor	Função
RD2	RUN	Verde	Indica que o microcontrolador está a executar o programa. O seu estado deve ser alternado entre ligado e desligado com uma frequência de 500 ms.
RD3	ERROR	Vermelho	No estado ligado, indica que ocorreu um erro na execução do programa.
RC4	RS232	Verde	Liga quando existe uma comunicação (bidireccional) através da porta série RS232.

Utilizaram-se ainda mais quatro LED's para indicar o estado dos relés. Estes foram ligados directamente à saída do driver UDN2981A. Assim, ao actuar-se sobre o estado dos relés, existe uma confirmação visual através do LED correspondente.

3.9) LCD

O LCD utilizado foi o modelo **PC-2002-L** do fabricante **PowerTip™**. Trata-se de um LCD com duas linhas de 16 caracteres, monocromático com iluminação LED.

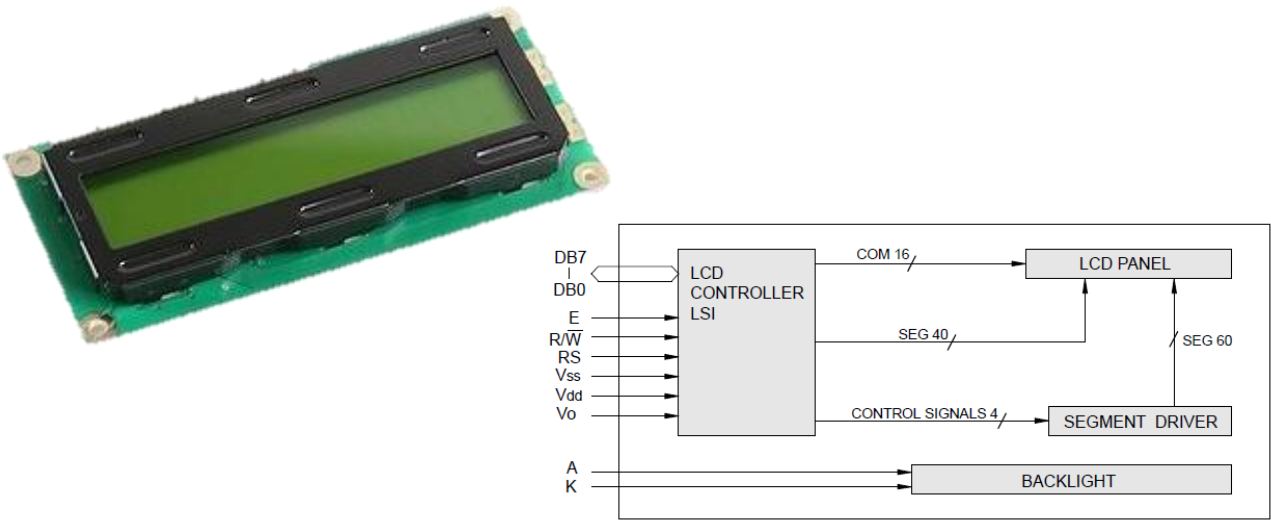


Figura 48 - Aspecto do LCD PC-2002-L. Circuito interno do LCD.

A tabela seguinte apresenta as ligações eléctricas do LCD no circuito.

Tabela 21- Ligações no LCD.

Pino	Símbolo	Função	Pino no circuito/PIC
1	Vss	GND	GND
2	Vdd	+5V DC	+5V DC
3	Vo	Ajuste Contraste	Potenciómetro 10KΩ
4	RS	Register Select	RC5
5	R/W	Data Read / Write	RD4
6	E	Enable	RD5
7	DB0	Data bus 0	-
8	DB1	Data bus 1	-
9	DB2	Data bus 2	-
10	DB3	Data bus 3	-
11	DB4	Data bus 4	RD0
12	DB5	Data bus 5	RD1
13	DB6	Data bus 6	RD7
14	DB7	Data bus 7	RD6

O LCD foi programado utilizando o modo 4 bits, neste modo só são utilizados os pinos DB4-DB7.

3.10) Fontes de alimentação

Na escolha das fontes de alimentação, atendeu-se aos requisitos de todos os componentes.

As tensões necessárias são:

- Drivers dos motores → +24V DC (2x 3A max.)
- Circuito electrónico de controlo → +5V DC (2A max.)
- Laser e Iluminação → +12V DC (1A max.)

Seleccionaram-se duas fontes, uma para fornecer os +24V DC, e outra para fornecer os +12V DC e os +5V DC.

Fonte de alimentação +24V DC

A fonte selecciona é o modelo **LCL300PS24** do fabricante **XP-Power™**. Esta fonte disponibiliza 24 V contínuos, com uma potência máxima de 300W. Para os motores, no máximo, serão necessários 3A a 24V DC por driver do motor, temos assim cerca de 72 W por driver, num total de aproximadamente 150W. Esta fonte de alimentação garante assim um funcionamento confortável, afastado dos limites da própria fonte.



Figura 49 - Aspecto das fontes de alimentação XP-Power.

Fonte de alimentação +12V/+5V DC

A fonte selecciona é o modelo **SDS60UT05** do fabricante **XP-Power™**. Esta fonte disponibiliza +12V contínuo, com uma potência máxima de 36W, e +5V DC com um máximo de 30W.



Figura 50 - Fonte alimentação XP-Power SDS60UT05.

3.11) Circuito electrónico

O desenho do circuito electrónico que integra todos os componentes anteriormente descritos realizou-se no *software* **Proteus™ ISIS Lite V5.20**. Atribuiu-se o nome “**métrica controller**” ao circuito de controlo do Métrica Vertebral – Automático.

A figura 51 apresenta o circuito electrónico **métrica controller V1.0**.

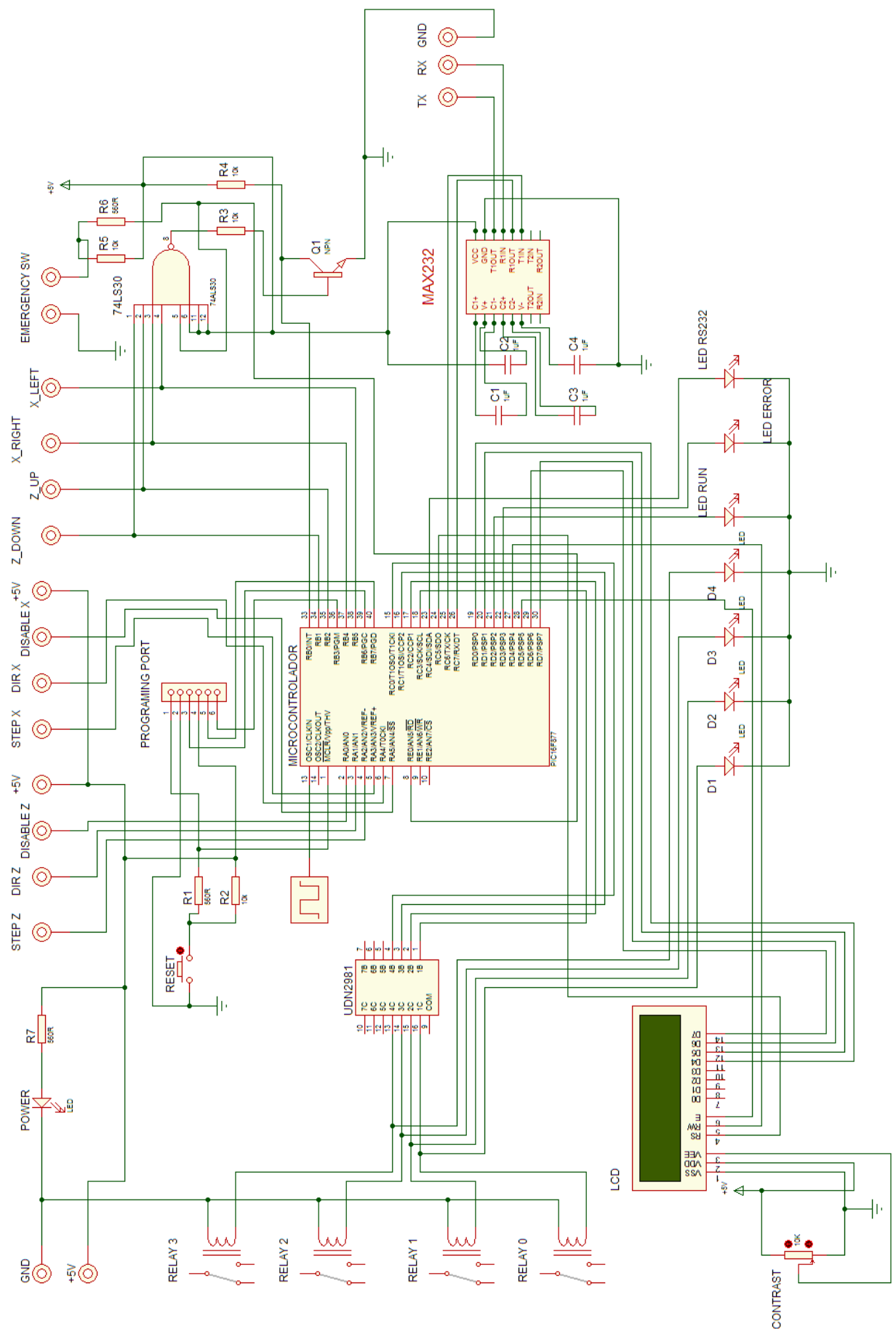


Figura 51 - Esquema do circuito electrónico do Métrica Controller V1.0.

Circuito Impresso

O circuito impresso foi desenhado no *software* Proteus™ ARES V5.20.

A estratégia utilizada neste desenho, foi posicionar o microcontrolador no centro do circuito e posicionar o resto dos componentes na sua periferia. Os ligadores para condutores eléctricos colocaram-se nas extremidades do circuito impresso, teve-se em conta o desenho das pistas de alimentação, evitando sobreposições entre as duas faces da placa de circuito impresso. Colocaram-se ainda condensadores de desacoplamento de 1µF junto às alimentações dos circuitos integrados. Por último desenhou-se no próprio circuito o valor da maioria dos componentes para permitir uma fácil identificação dos mesmos. A figura seguinte apresenta o circuito impresso desenhado e o mesmo após produção.

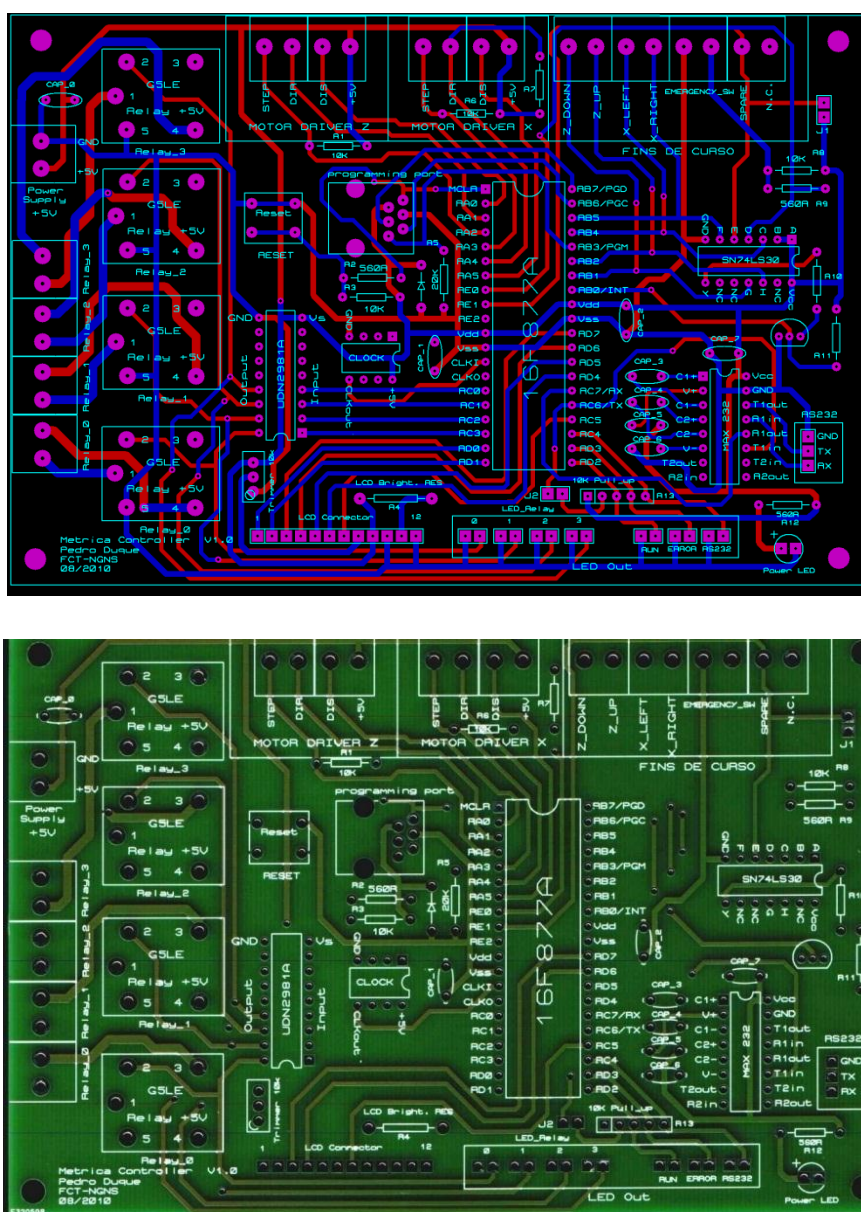


Figura 52 – Desenho do circuito impresso.

Placa de circuito impresso do Métrica Controller (vista de topo).

3.12) Montagem do *hardware*

O primeiro passo na montagem do *hardware* foi implementar a placa de circuito impresso, foram soldados todos os componentes de acordo com o circuito electrónico.

Em seguida procedeu-se à montagem de todos os componentes numa caixa do tipo rack 19". Todos os fios condutores foram ligados através de ligadores de calha DIN, para facilitar as ligações e futuros *upgrades*.

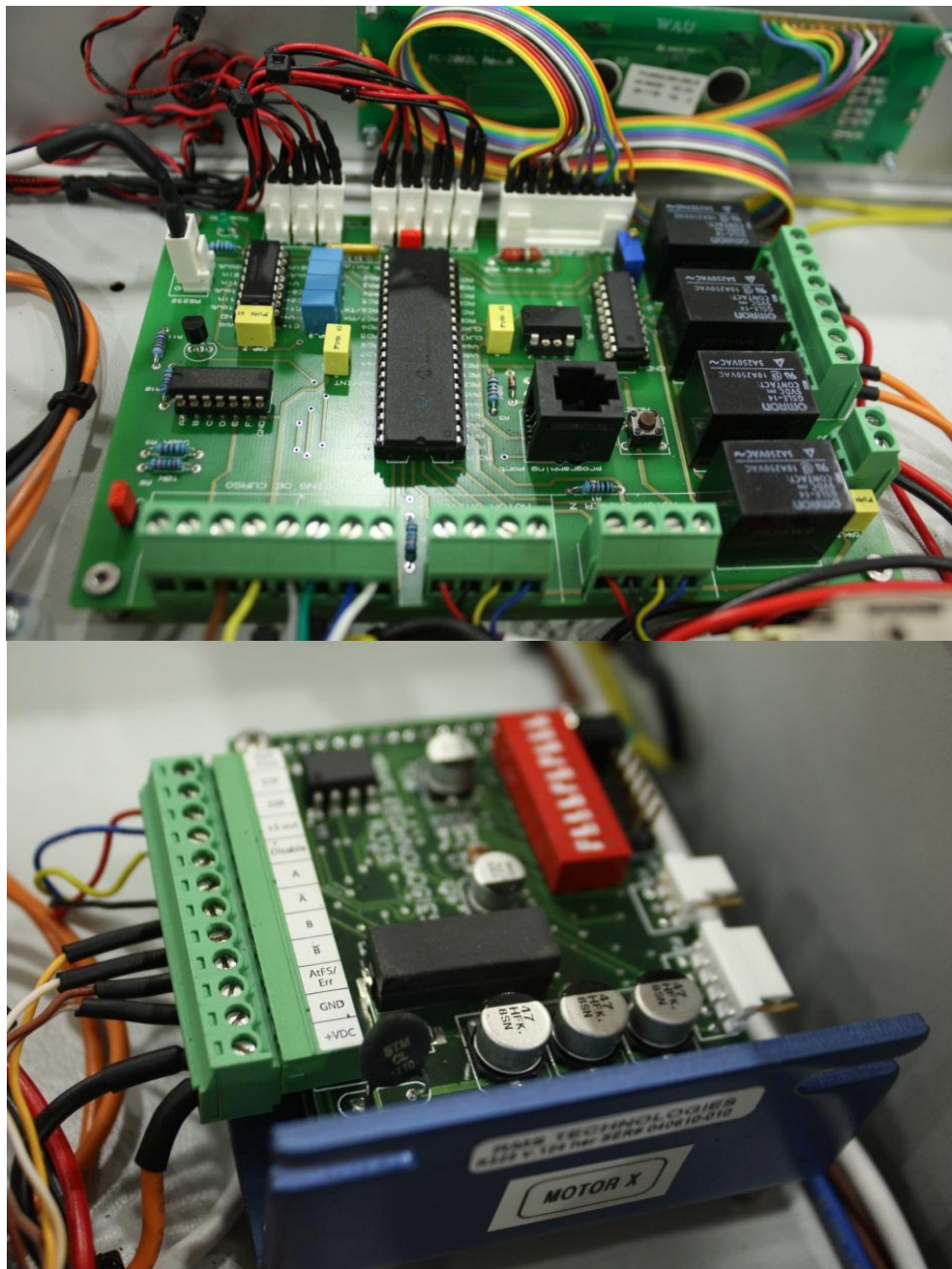


Figura 53 - Montagem dos componentes no circuito impresso.

Driver do motor X com os condutores ligados.

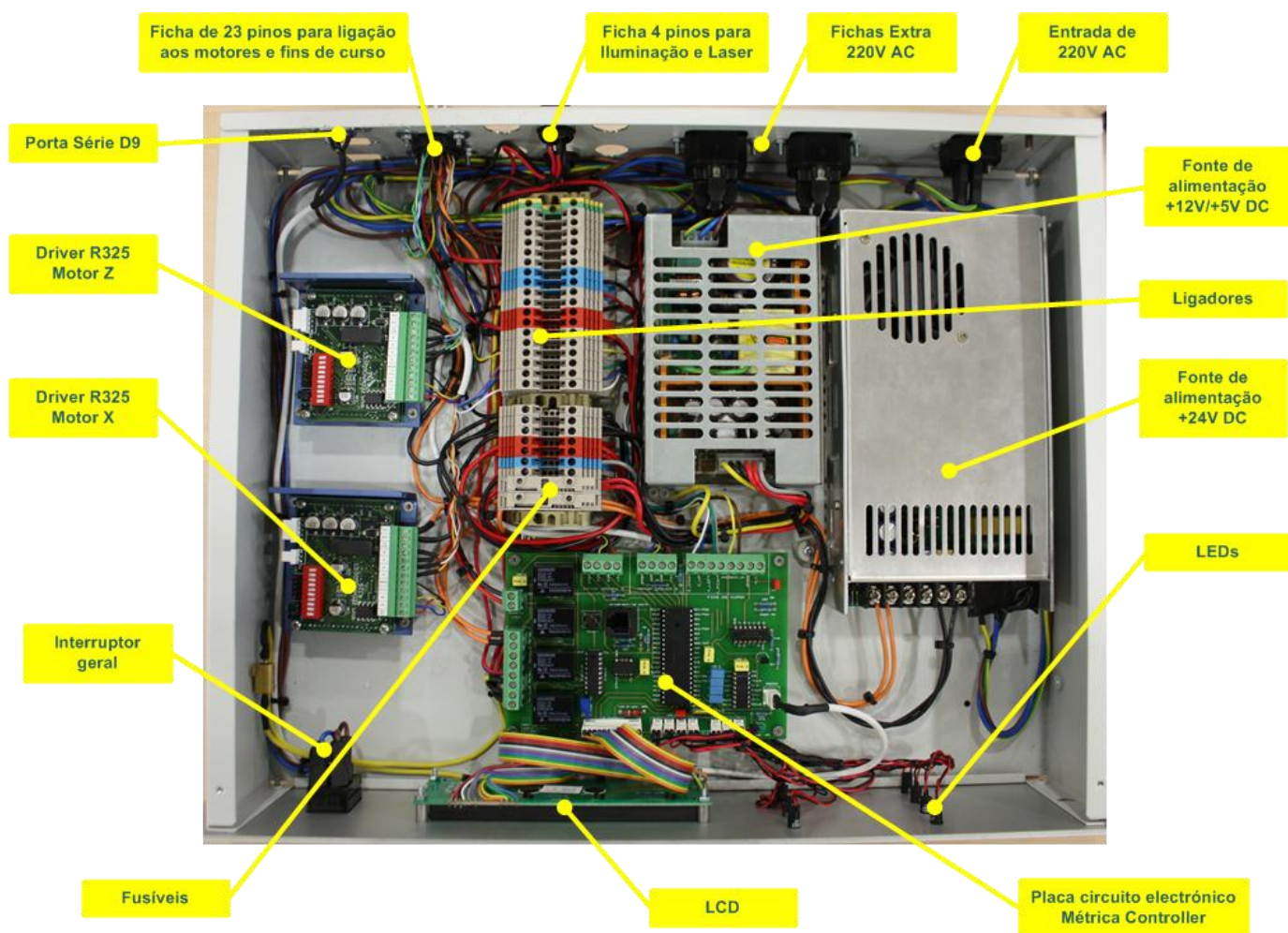


Figura 54 -Visão geral do controlador.



Figura 55 - Vista do painel frontal. Vista do painel traseiro.

4) Programação do Microcontrolador

Após a montagem de todos os componentes, procedeu-se à programação do microprocessador PIC16F877A. Este capítulo aborda o processo de desenvolvimento do código do programa *Métrica Controller*.

A programação do microcontrolador foi efectuada através do *software* MPLAB. A programação foi realizada através da linguagem C e do programa *MPLAB IDE V8.46™* da *Microchip™*. O compilador utilizado foi o *HI-TECH PICC Tollsuite™*. [16]

O *MPLAB* permite a ligação ao programador/debugger da *Microchip®*, *ICD 2 In-Circuit Debugger/Programmer*.

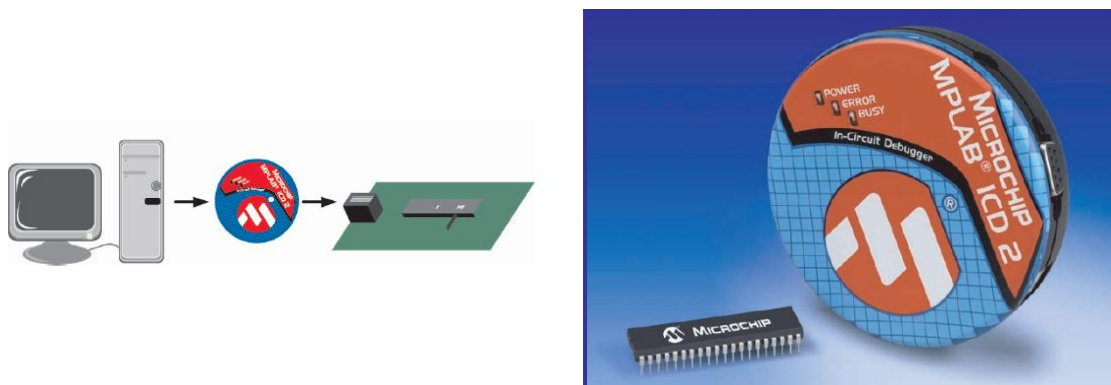


Figura 56 – Programador/Debugger da Microchip™.

Este programador tem como grande vantagem a possibilidade de se poder fazer *debug* ao programa por *hardware*, e por isso em tempo real. É ainda possível fazer breakpoints em determinados pontos do programa ou ainda observar variáveis, registos do PIC ou mesmo a memória EEPROM.

4.1) Definição do protocolo RS232

Antes do desenvolvimento do programa de controlo do *métrica controller*, definiu-se uma lista de comandos a serem implementados. Esses comandos formam o protocolo de comunicação entre o computador e o *métrica controller*.

O métrica controller comporta-se como um dispositivo *slave* perante o computador de controlo, ou seja, quem inicia comunicações será sempre o computador. O protocolo definido é do tipo Pergunta → Resposta. Para qualquer comando existe sempre uma resposta.

As comunicações série são feitas através da porta série RS232, com a seguinte configuração:

Tabela 22 - Configuração da comunicação RS232.

Parâmetro	Valor
Baud rate	9600
Data bits	8
Parity	None
Stop bits	1
Handshaking	None

Na tabela seguinte encontra-se a lista resumida de comandos disponíveis no *métrica controller*. A explicação detalhada (sintaxe) dos comandos, encontra-se no anexo B.

Tabela 23 - Lista resumida de comandos do métrica controller.

Comando	String	Resposta	Descrição
Status	FFh 01h	FFh 02h ###	Envia o estado do sistema. 01h – Ready; 04h – Run; 05h – Error; 06h - Emergency
Start Acquisition	FFh 02h	FFh 01h → OK FFh 10h → ERROR	Inicia o sistema em modo de aquisição.
Stop Acquisition	FFh BBh	FFh 01h → OK FFh 10h → ERROR	Termina o modo de aquisição.
Move X/Z	FFh 08h %%h ###h ###h ###h	FFh 01h → OK FFh 10h → ERROR	Move o motor %% para uma determinada posição em µm.
Stop Move	FFh AAh %%h	FFh 01h → OK FFh 10h → ERROR	Termina o movimento do motor %%.
Set Speed	FFh 40h %%h \$\$h \$\$h	FFh 01h → OK FFh 10h → ERROR	Define a velocidade do motor %% em mm/s.
Get Actual Position	FFh 05h %%h	FFh %%h ###h ###h ###h (MSB) -- (LSB)	Devolve a posição actual do posicionador %% em µm.
Set Home Position	FFh 07h	FFh 01h → OK FFh 10h → ERROR	Define a posição como a posição de Home Position.
Go to Home Position	FFh 12h	FFh 01h → OK FFh 10h → ERROR	Move o posicionador para a posição Home Position.
Store Actual Position	FFh 09h	FFh 01h → OK FFh 10h → ERROR	Durante uma aquisição, guarda a posição actual do posicionador em X e Z
Get Positions	FFh 10h	FFh %%h ###h ###h ###h	Devolve todas as posições guardadas na EEPROM.
Set Relay	FFh 30h &&h ##h	FFh 01h → OK FFh 10h → ERROR	Define o estado && do relé ## como Ligado (01) ou desligado (00)
Get Relay	FFh 31h ##h	FFh &&h ##h	Devolve o estado && do relé ##.
Go to Park Position	FFh 50h	FFh 01h → OK FFh 10h → ERROR	Move o posicionador para a posição park. Coordenada X=0 e Z=0.
Emergency Stop	FFh 55h	FFh 01h → OK FFh 10h → ERROR	Coloca o sistema no modo emergency.

4.2) Desenvolvimento do programa: Métrica Controller V1.0

Neste capítulo iremos abordar a programação do algoritmo que constitui o programa do *métrica controller*. As várias rotinas que compõem o programa serão apresentadas sob a forma de fluxograma, evidenciando os principais passos e variáveis de controlo. O código completo encontra-se no anexo desta dissertação.

O ponto de partida para a construção do código do programa foi a geração de impulsos para mover os motores e o registo permanente do número de passos efectuado.

Existem pelo menos duas formas de conseguir gerar um sinal periódico no PIC, através do módulo PWM (Pulse With Modulation) ou através de comutação entre LOW e HIGH de um porto do PIC.

O PWM permite configurar a frequência dos impulsos, mas não é possível obter feedback durante o programa, de quantos impulsos foram gerados, ou seja, o número de passos não seria registado correctamente.

A solução encontrada foi: através da rotina de interrupts do microcontrolador PIC, comutar um sinal lógico num dos portos digitais. É importante que essa comutação seja realizada na rotina de interrupts, pois assim, há garantia que cada comutação de estado do porto é acompanhada pelo incremento do registo do número de passos dados pelo motor.

Uma rotina de interrupt, tem sempre prioridade sobre o resto do código, quando esta é chamada, o código é interrompido, e assim que aquela termina, o programa é retomado.

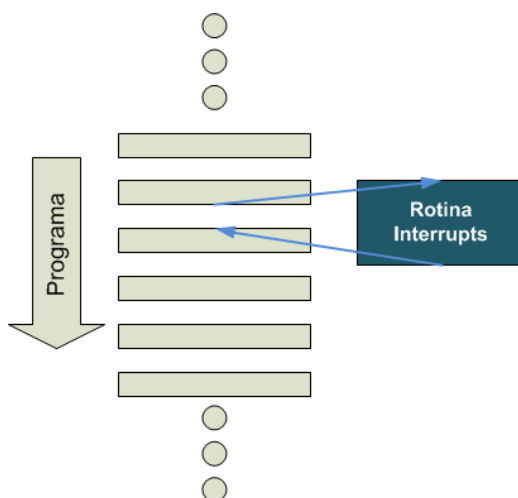
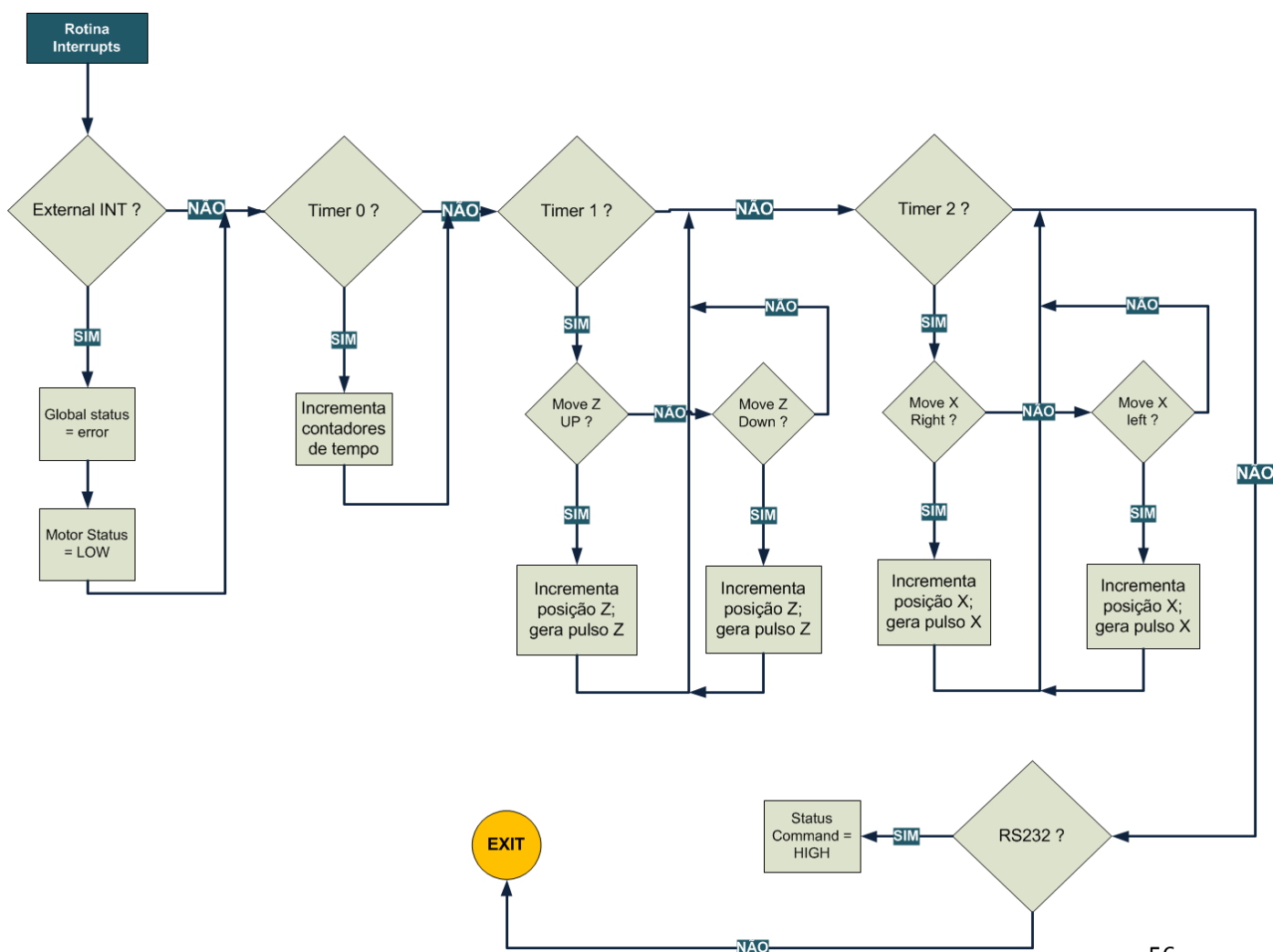


Figura 57 - Diagrama da chamada de uma rotina de interrupt.

O microcontrolador PIC 16F877A possui três timers internos independentes e configuráveis. Os timers 0 e 2 são timers de 8 bits, ou seja, começando em 0, incrementam a cada ciclo de instrução, até 255. Quando atingem o 255, uma *flag* de interrupt é activada, e esse evento é detectado na rotina de interrupts do microcontrolador. O timer 1 é de 16 bits, portanto, incrementa até 65535, gerando o interrupt neste valor. Ambos os timers, 1 e 2 são configuráveis no valor em qual terminam a contagem, por exemplo, o timer 1 pode incrementar até 50000 e gerar o interrupt neste valor. Foi com esta característica que se programou os geradores de impulsos para os drivers dos motores.

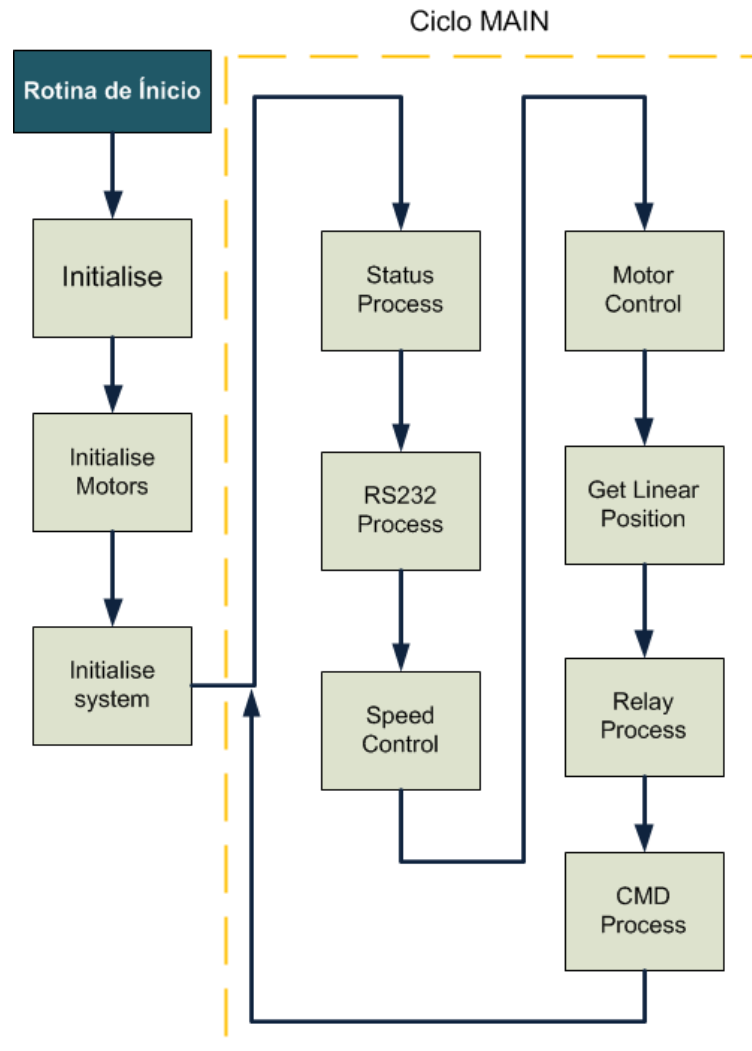
Configurando independentemente os timers 1 e 2 é possível a cada ocorrência de interrupt, gerar um impulso nos drivers dos motores. Variando o valor no qual o interrupt é criado, varia-se a frequência de impulsos gerados, e consecutivamente a velocidade de rotação dos motores. Em cada impulso gerado o número de passos do motor é actualizado e registado na memória do microcontrolador.

4.2.1) Rotina de Interrupts



4.2.2) Rotina de Inicialização

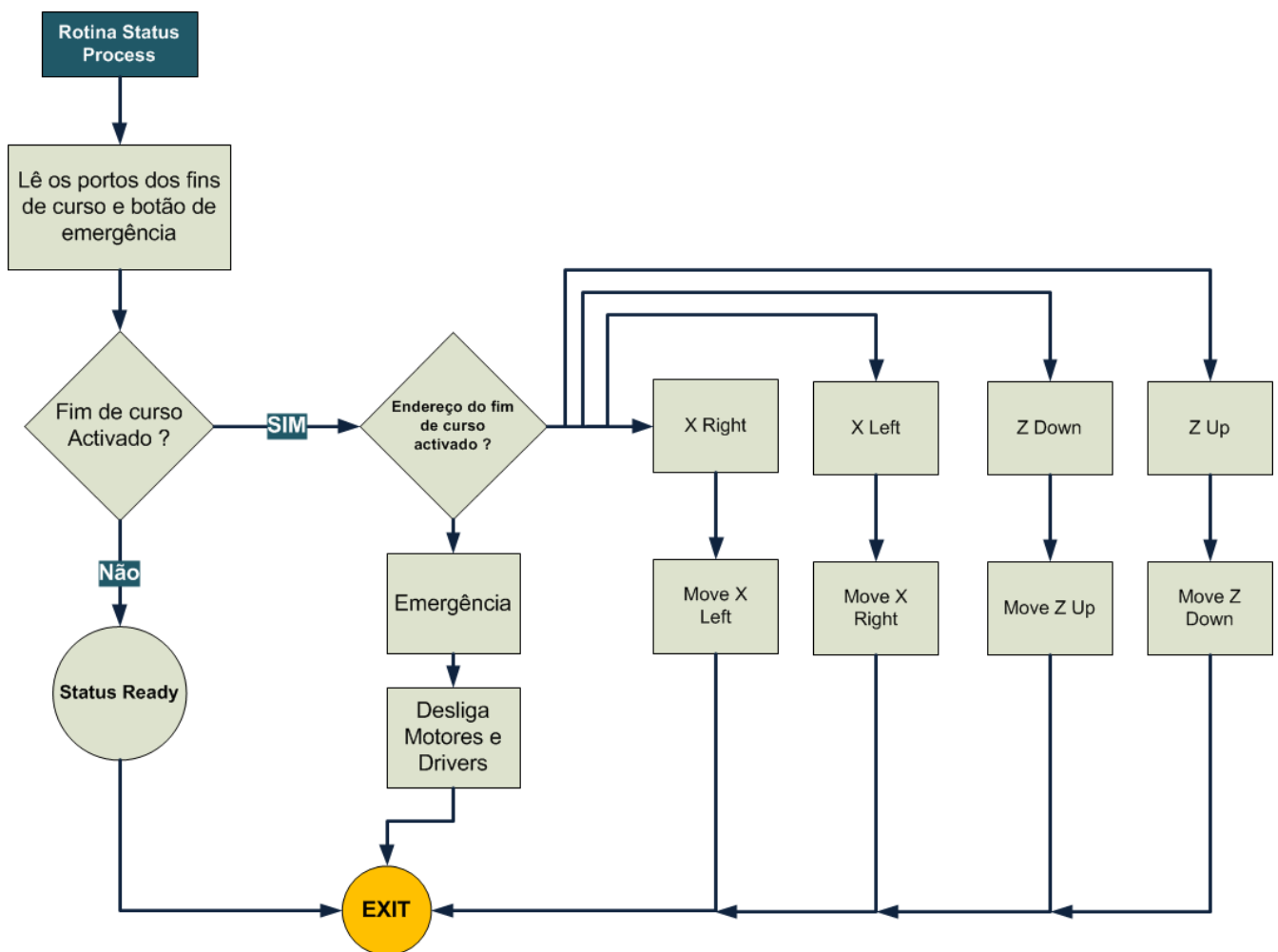
Esta rotina representa a sequência do programa quando o microcontrolador é alimentado.



Os três primeiros blocos representam a inicialização de todas as variáveis do programa, configuração dos portos, timers, interrupts do PIC, bem como a preparação dos motores, reinicialização de registos de posições, etc. No ciclo **main** encontram-se as rotinas que estão a ser chamadas indefinidamente num ciclo fechado.

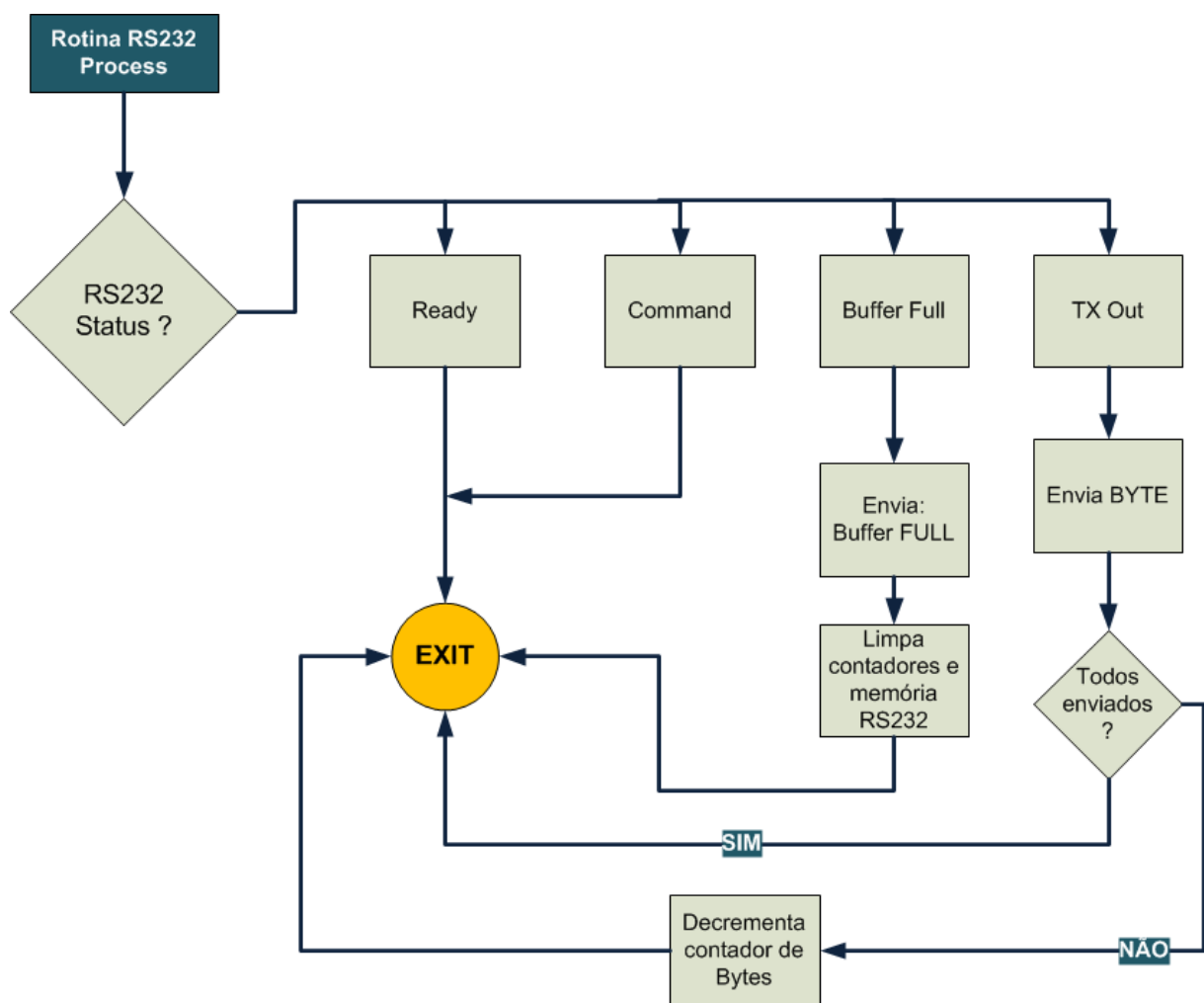
4.2.3) Rotina Status Process

Nesta rotina avalia-se o estado dos fins de curso e do interruptor de emergência. Se um dos fins de curso for activado o motor correspondente é programado para rodar no sentido contrário até desactivar o interruptor de fim de curso. No caso do interruptor de emergência, os motores são parados, e os drivers desactivados para permitir um movimento livre da estrutura. Neste caso o estado global do sistema passa para “*emergency*”.



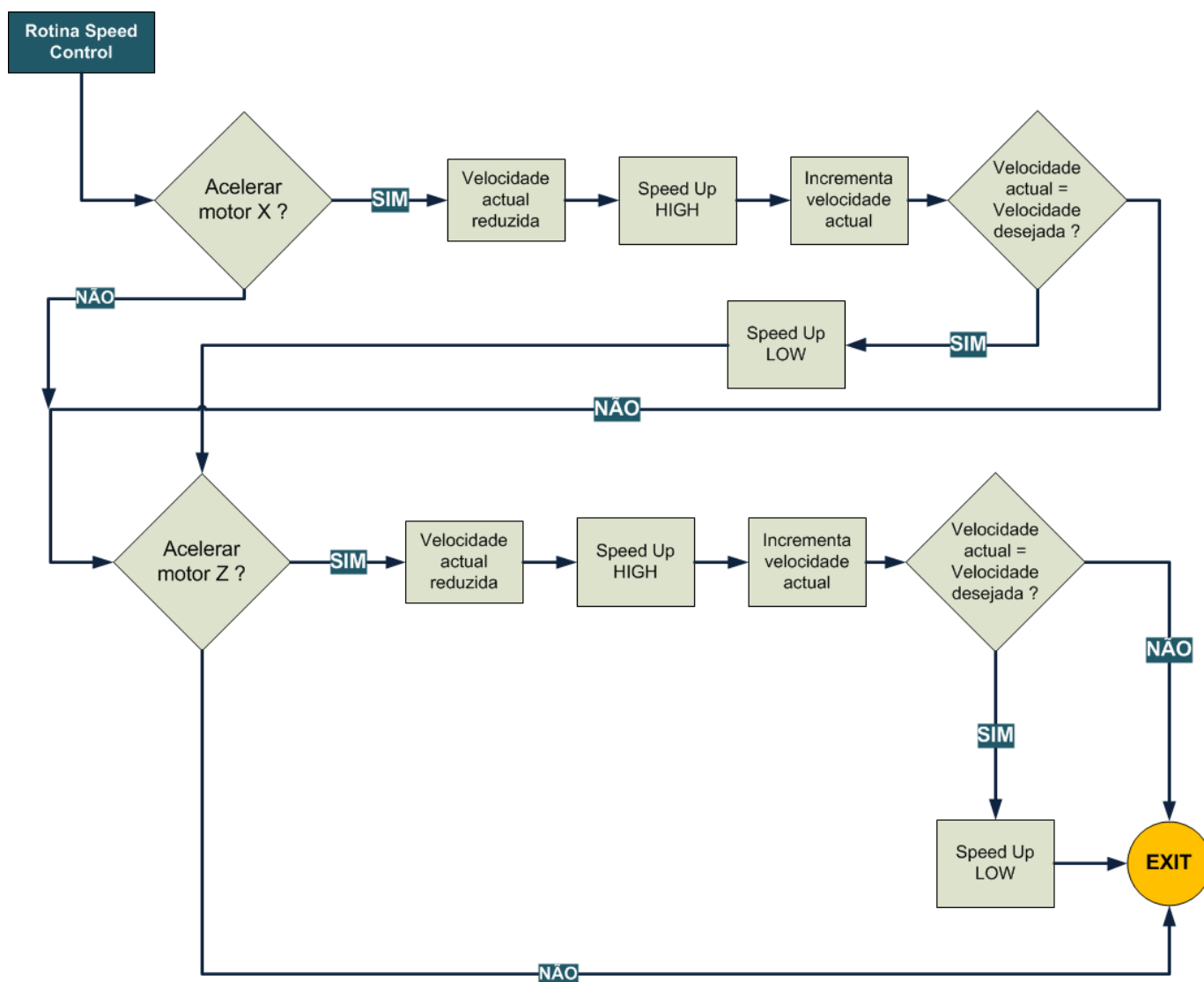
4.2.4) RS232 Process

A rotina RS232 Process monitoriza o estado da variável global RS232_Status. O estado desta variável é alterado na rotina de interrupts e durante as outras rotinas. Os dois estados mais importantes são o TX Out e o Command. O estado TX Out, envia todos os bytes que estiverem na memória temporária do RS232. O estado command, indica à rotina Command Process, que foi recebido um comando na porta série que necessita ser processado.



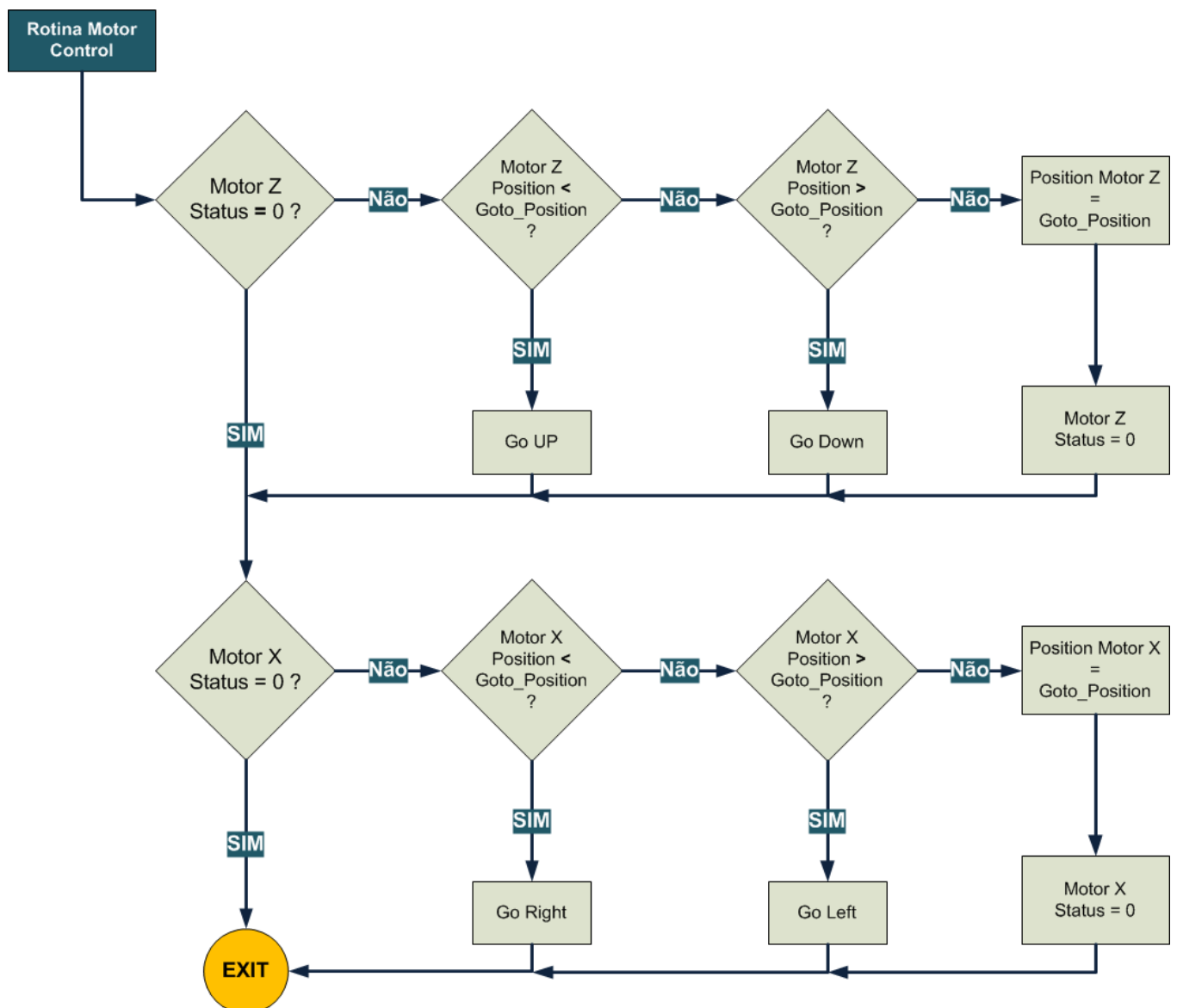
4.2.5) Rotina Speed Control

Nesta rotina é avaliado o estado da variável **Speed Up**, esta variável define se os motores devem ser acelerados, ou não. Os motores sofrem aceleração no movimento excepto durante a aquisição, nesta situação foi requisitado que os motores tivessem aceleração nula para permitir cálculos de posição/velocidade. Assim, se a variável Speed Up, estiver no estado HIGH, a velocidade do motor é reduzida para um valor menor da actual, seguidamente é incrementada em cada ciclo até atingir a velocidade desejada.



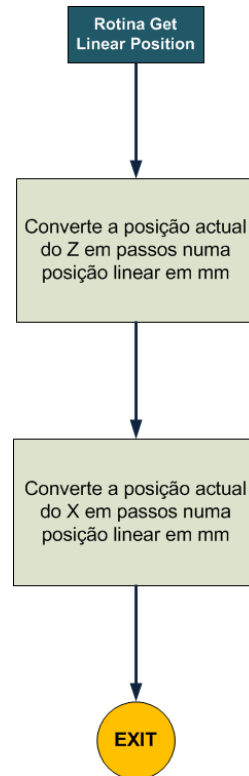
4.2.6) Rotina Motor Control

A rotina *motor control*, o estado dos motores, nomeadamente a variável **motor.status**. Se esta for diferente de zero, é comparado o valor da posição actual com o valor da variável **Goto Position**. Dependendo do resultado o motor é configurado para rodar num sentido ou noutro.

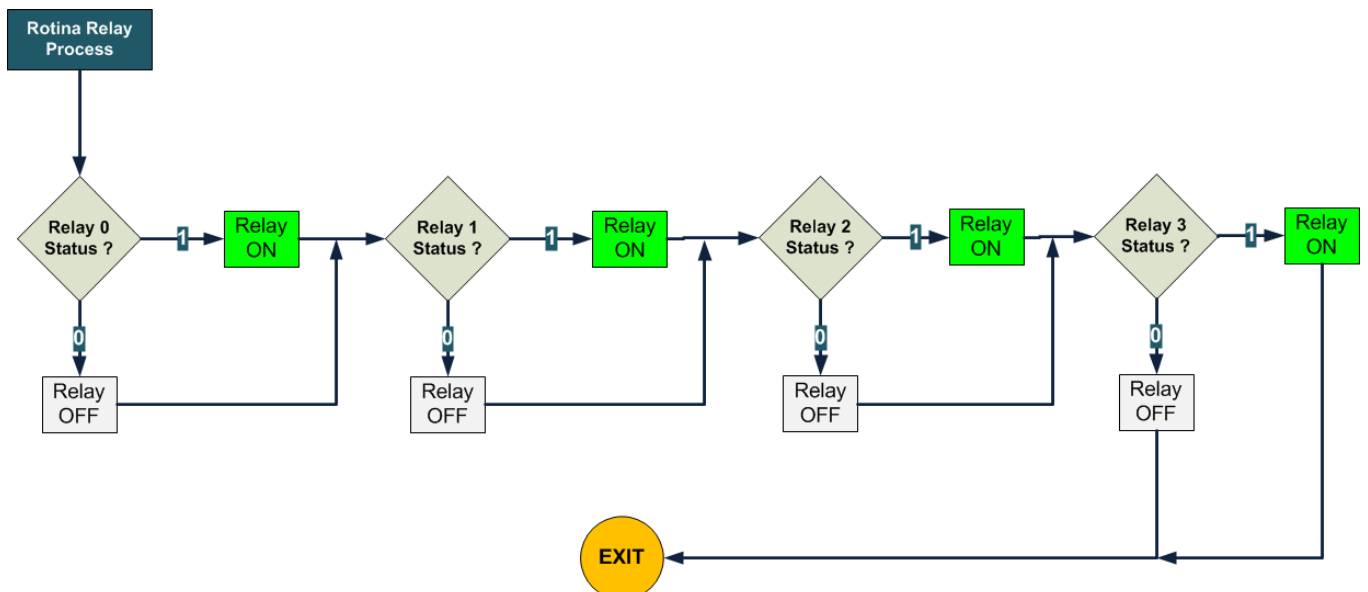


4.2.7) Rotina Get Linear Position

A posição absoluta do posicionador é controlada, sempre em número de passos que os motores executam, no entanto a sua conversão em posição linear (mm) é convertida constantemente, para ser disponibilizada ao *software* do computador.

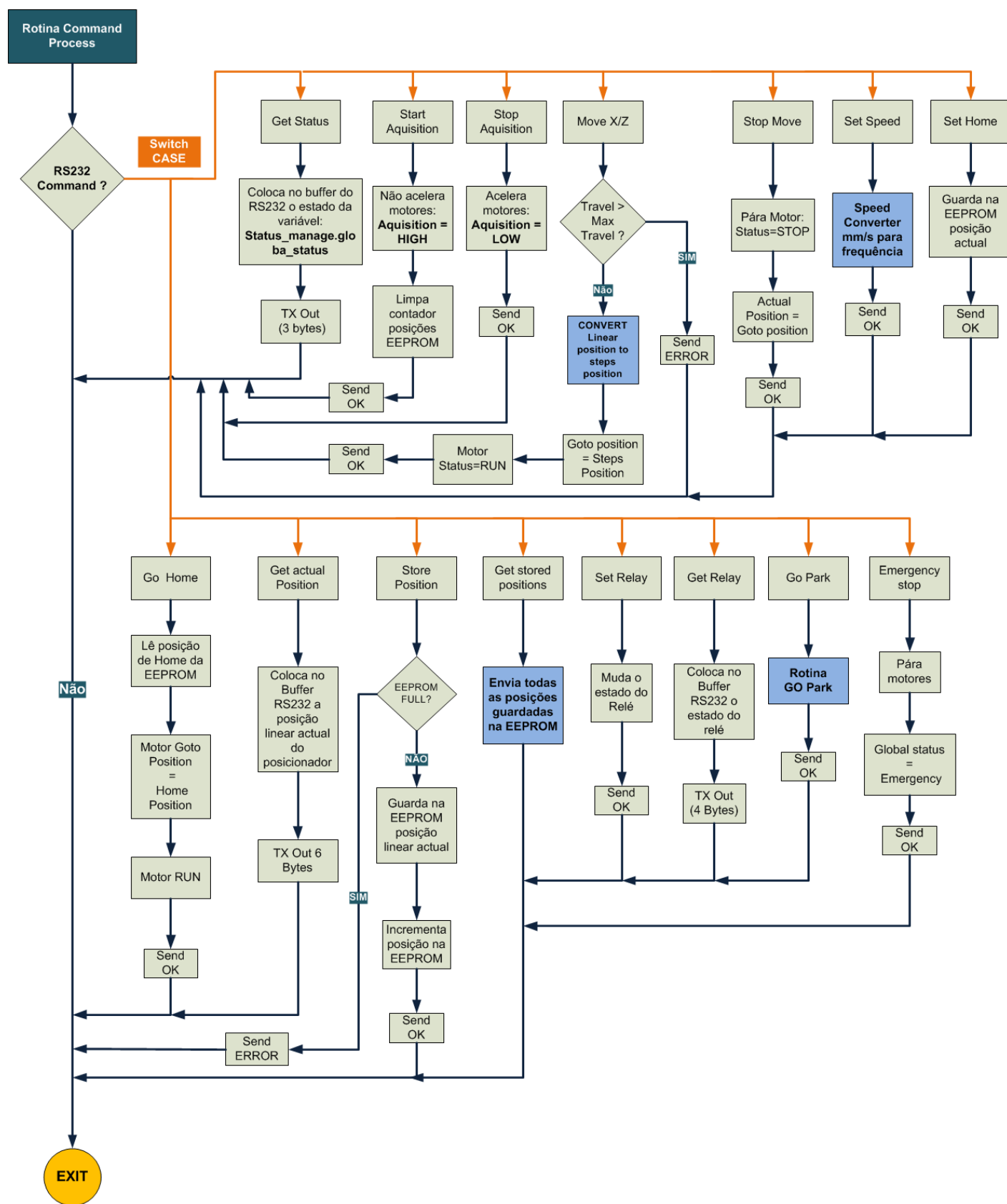


4.2.8) Rotina Relay Process



Nesta rotina o estado de cada relé é actualizado de acordo com a variável **relay status**.

4.2.9) Rotina Command Process



A rotina *Command Process* executa o comando correspondente ao que é solicitado pela rotina RS232.

5) Testes e desempenho

Foram realizados testes preliminares de posicionamento X e Z. Para os primeiros testes, o movimento foi directamente programado nas variáveis de controlo através do *debugger* do MPLAB. Obtiveram-se resultados muito positivos no movimento e testaram-se as velocidades. O surgimento de ressonâncias foi notório para determinadas posições do posicionador X, estas ressonâncias irão ser discutidas no capítulo conclusão.

O teste seguinte foi o da comunicação série. Utilizando o *software Terminal*, enviaram-se os comandos definidos no protocolo e comprovou-se o seu correcto funcionamento. De notar que o comando mais demorado foi o de leitura das posições guardadas na EEPROM, este comando pode demorar até 1s a completar o envio de todos os bytes. Efectuou-se também um teste de “*stress*” às comunicações, enviando um comando a cada 250 ms, os resultados foram satisfatórios, pois o sistema manteve-se operacional respondendo a todos os comandos interpretados correctamente, não sofrendo nenhuma paragem no funcionamento do programa.

Para determinar a precisão do posicionador utilizou-se apontador laser e uma folha de papel milimétrico (ver figura 58). Com o laser fixo à estrutura do posicionador e alinhado com um ponto definido no papel milimétrico, iniciou-se uma série de comandos via RS232, esses comandos foram de movimento em X e em Z das seguintes posições, 1 mm, 10 mm e 100 mm. Cada posicionamento foi confirmado no papel milimétrico. Devido ao diâmetro do ponto luminoso do apontador laser ser superior a 1 mm, utilizou-se uma craveira digital para ajudar na medição da posição. Efectuaram-se 10 medições para cada posicionamento. A tabela 24 apresenta os resultados destes testes preliminares.

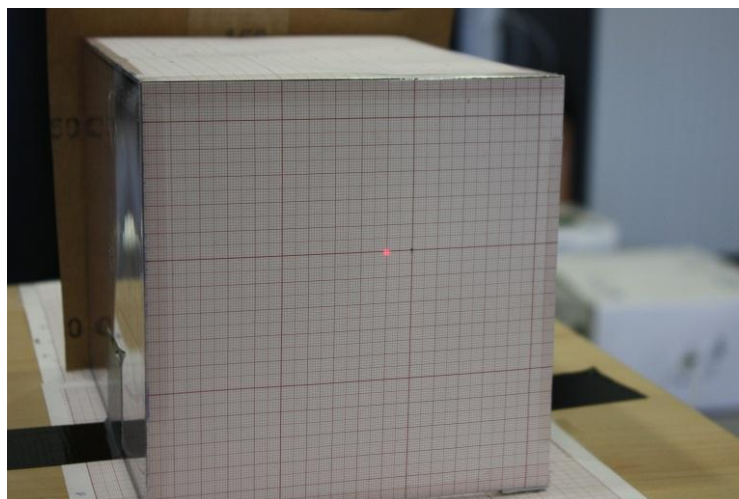


Figura 58 - Aparato experimental para teste do posicionamento X e Z.

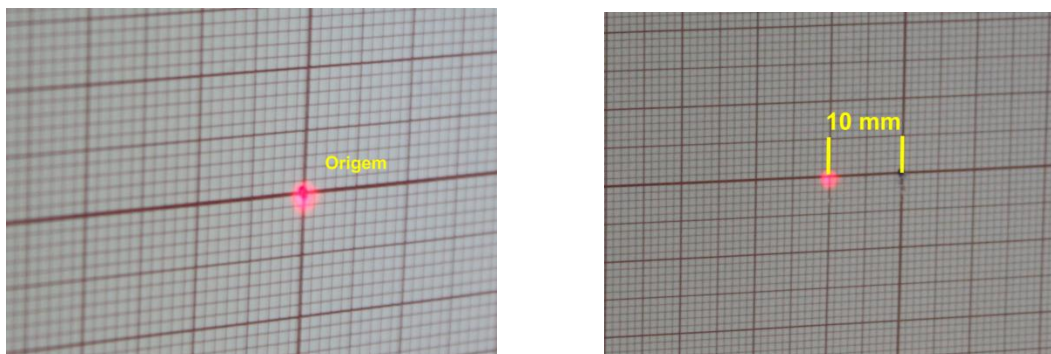


Figura 59 - Exemplo de um posicionamento em X de 10 mm.

Tabela 24 - Teste posicionamento X/Z.

Motor X				Motor Z			
Posição	Medido	Posição	Medido	Posição	Medido	Posição	Medido
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1	0,97	10	10,19	1	1,01	10	10,18
1	0,99	10	10,12	1	1,02	10	9,98
1	0,86	10	10,38	1	0,98	10	10,23
1	1,02	10	10,5	1	1,03	10	10,02
1	0,99	10	9,87	1	1,02	10	10,1
1	1,09	100	99,44	1	0,96	100	100,38
1	1,05	100	100,07	1	1	100	100,42
1	1,06	100	99,76	1	1,01	100	99,77
1	1,06	100	100,12	1	0,97	100	100,05
1	1,11	100	99,68	1	0,99	100	100,47
10	9,97	100	99,7	10	10,26	100	100,01
10	10,18	100	100,14	10	10,45	100	100,23
10	10,08	100	100,04	10	10,02	100	100,4
10	9,85	100	100,43	10	10,2	100	100,07
10	10,27	100	99,72	10	10,19	100	99,85

Tabela 25 - Média e desvio padrão das medições.

		1 mm	10 mm	100 mm
X	Média	1,020	10,141	99,910
	Desvio padrão	0,072	0,210	0,296
Z	Média	0,999	10,163	100,165
	Desvio padrão	0,023	0,140	0,251

Realizaram-se ainda com sucesso testes de integração com o *software* de detecção das apófises.

6) Conclusão e Perspectivas Futuras

Os objectivos propostos foram atingidos, os testes de integração com a segunda e terceira parte deste projecto foram positivos (Software de detecção das apófises e representação 3D da coluna).

Os valores dos testes preliminares de posicionamento (tabela 24 e 25), demonstram uma resolução inferior a 0,3 mm, no entanto era esperado mais resolução por parte do sistema. Este erro atribuiu-se essencialmente à medição através da craveira digital, pois depende estritamente da avaliação visual.

O movimento dos motores revelou alguma ressonância em determinadas velocidades. Esta vibração também se evidenciava em determinadas posições do posicionador.

A decisão de centralizar o estágio horizontal X em relação à mesa linear e não ao conjunto mesa linear + motor, causou uma descentralização do centro de massa de toda a estrutura X, um movimento perto da origem provoca mais vibrações do que quando o posicionador se desloca mais para o final do percurso. O suporte da calha Z que acopla à base de suporte do estágio horizontal, sofre uma força de torção que causa as vibrações observadas. Este torna-se um dos pontos a melhorar em projectos futuros, deve considerar-se uma mesa linear mais pequena, mais leve e centrada no seu centro de massa.

As velocidades conseguidas cumpriram os objectivos previstos, tendo atingido uma velocidade máxima em Z de 250 mm/s (com aceleração), e de 100 mm/s em X. No entanto estes valores foram apenas limitados pelo microcontrolador. Durante testes com um gerador de sinais externo conseguiu-se, com aceleração, 750 mm/s de velocidade.

O objectivo de deslocar o posicionador 1m em 30s foi atingido, já que corresponde a 33.3 mm/s, velocidade inferior à máxima.

Em relação à estrutura de suporte do métrica vertebral – automático, não se concluiu como seria a estrutura final, se auto-sustentada, e por isso uma estrutura que permitisse o

fácil transporte e instalação do equipamento, ou uma estrutura fixa, por exemplo para ser fixada numa parede. O suporte do motor Z também depende bastante da estrutura global de suporte. Deixam-se estas decisões para a continuação deste projecto no futuro.

A integração dos 3 projectos envolvidos permitiu fazer aquisições das posições de pontos marcados numa estrutura de teste. Os resultados foram positivos, conseguindo-se adquirir as coordenadas XYZ de cada ponto e ainda realizar uma representação tridimensional desses pontos.

O projecto **Métrica Vertebral – Automático**, provou ser um desafio em termos de desenvolvimento, as áreas multidisciplinares que eram exigidas foram diversificadas e estimulantes.

Considera-se um projecto com elevado interesse devido ao seu impacto na inovação ao nível de equipamentos de diagnóstico (sem radiação ionizante), mais propriamente, na detecção de patologias da coluna vertebral.

Referências

- [1] – Quaresma, C.; Secca M.; O'Neill J.; Branco J.;(2009); Development of a Mechanical Instrument to Evaluate Biomechanically the Spinal Column in Pregnant Women; Proc. Internacional Conference Biodevice, 310-113.
- [2] – Quaresma, C.; João, F.; Fonseca, M.; Secca, M.; Veloso, A.; O'Neill, J.; Branco, J.; (2009); Validation of Vertebral Metrics: a mechanical instrument to evaluate posture of the spinal column.; O. Dössel and W.C. Schlegel (Eds.): WC IFMBE Proceedings 25/VII, 711–713.
- [3] – Cláudia Quaresma, Filipa João, Miguel Fonseca, Mário Forjaz Secca, António Veloso, João Goyri O'Neill, Jorge Branco; *Comparative evaluation of the tridimensional spine position measured with a new instrument (Vertebral Metrics) and an Optoelectronic System Stereophotogrammetry*;
- [4] – www.skf.com (Outubro 2010)
- [5] – <http://pt.wikipedia.org/wiki/Torque> (Outubro 2010)
- [6] – Chouzal, Maria de Fátima de Castro, (1991);”*Controlo digital de motores passo a passo.*”; Departamento de Eng^a. Electrotécnica e de Computadores da Universidade do Porto.
- [7] – <http://www.uiowa.edu/~jones/step/types.html> (Outubro 2010)
- [8] – www.allaboutcircuits.com/vol_2/chpt_13/5.html (Outubro 2010)
- [9] – <http://www.linengineering.com/LinE/> (Outubro 2010)
- [10] – <http://www.igus.de/> (Outubro 2010)
- [11] – www.massmind.org/techref/io/stepper/nemasizes.html (Outubro 2010)
- [12] – Omron (Outubro 2010)
http://components.omron.eu/en/products/catalogue/relays/pcb_power_relays/up_to_16a/g5le
- [13] – <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39582b.pdf> (Outubro 2010)
- [14] – http://www.taltech.com/TALtech_web/resources/intro-sc.html (Outubro 2010)
- [15] – http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/7/4/L/S/74LS30.shtml (Outubro 2010)
- [16] – Microchip www.microchip.com (Outubro 2010)

ANEXOS

Lista de comandos do Métrica Controller.

Os comandos são enviados no formato Hexadecimal, indicado por h.

STATUS:

O comando **Status** permite obter informação do estado actual do métrica controller.

Sintaxe:

Comando:

(2 bytes) FFh 01h

Resposta:

(3 bytes) FFh 02h ##h

Em que **##** pode ser:

01h → Ready - O sistema está pronto para receber comandos.

02h → Not Ready – O sistema está a processar um comando e não pode executar outro.

04h → Run – O posicionador encontra-se em movimento.

05h → Error – Ocorreu um erro no sistema.

06h → Emergency SW – O interruptor de emergência foi activado e os motores estão parados.

07h → Limit SW – O posicionador chegou a um extremo do deslocamento e activou um interruptor de fim de curso.

START acquisition:

O comando **Start acquisition** inicia o modo de aquisição. Neste modo os motores não sofrem aceleração, ou seja, a velocidade é constante. O contador de posições guardadas na EEPROM é reinicializado.

Sintaxe:

Comando:

(2 bytes) FFh 02h

Resposta:

(2 bytes) FFh 01h → OK

ou

FFh 10h → Erro na interpretação do comando.

STOP acquisition:

O comando **Stop acquisition** termina o modo de aquisição. Os motores sofrem aceleração quando recebem a ordem de movimento.

Sintaxe:

Comando:

(2 bytes) FFh BBh

Resposta:

(2 bytes) FFh 01h → OK

ou

FFh 10h → Erro na interpretação do comando.

MOVE X/Z:

O comando **move X/Z** inicia o modo movimento dos motores. O posicionador irá deslocar-se para a posição definida (desde que válida) no comando.

Sintaxe:

Comando:

(7 bytes) FFh 08h %%h ##h ##h ##h ##h

%%h → Indica qual o motor para movimentar:

00h → motor Z ;

01h → motor X ;

##h ##h ##h ##h → 4 bytes com a posição absoluta de destino em **µm**, O byte mais à esquerda é o MSB enquanto que o mais à direita é o LSB.

Resposta:

(2 bytes) FFh 01h → OK

ou

FFh 10h → Erro na interpretação do comando, ou posição fora dos limites de deslocamento do sistema.

Exemplo:

Pretende-se que o posicionador se desloque para a posição 50 000 µm na direcção X. (50 000 em hexadecimal: C3h 50h)

O comando seria: FFh 08h 01h 00h 00h C3h 50h

STOP move:

O comando **Stop move** termina o movimento dos motores.

Sintaxe:

Comando:

(3 bytes) FFh AAh %%h

%%h → Indica qual o motor:

00h → motor Z ;

01h → motor X ;

Resposta:

(2 bytes) FFh 01h → OK

ou

FFh 10h → Erro na interpretação do comando.

SET speed:

O comando **Set speed** define a velocidade de deslocamento do posicionador. Esta velocidade é definida em **mm/s**.

Sintaxe:

Comando:

(5 bytes) FFh 40h %%h \$\$h \$\$h

%%h → Indica qual o motor:

00h → motor Z ;

01h → motor X ;

\$\$h (MSB) \$\$h (LSB) → Velocidade em mm/s.

Resposta:

(2 bytes) FFh 01h → OK

ou

FFh 10h → Erro na interpretação do comando.

GET actual position:

O comando **Get actual position** solicita a posição actual do posicionador, na coordenada X ou Z.

Sintaxe:

Comando:

(3 bytes) FFh 05h %%h

%%h → Indica qual a coordenada:

00h → coordenada Z ;

01h → coordenada X ;

Resposta:

(6 bytes) FFh %%h ##h ##h ##h ##h

%%h → Indica qual a coordenada:

00h → coordenada Z ;

01h → coordenada X ;

##h (MSB) ##h ##h ##h (LSB) → Posição actual em µm.

ou

FFh 10h → Erro na interpretação do comando.

SET home position:

O comando **Set home position** define a posição actual do posicionador (X e Z) como sendo a nova Home Position. Esta posição é guardada na EEPROM do microcontrolador, estando disponível mesmo após um corte na alimentação do sistema.

Sintaxe:

Comando:

(2 bytes) FFh 07h

Resposta:

(2 bytes) FFh 01h → OK

ou

FFh 10h → Erro na interpretação do comando.

GO to home position:

O comando **Go to home position** move o posicionador para a posição guardada na EEPROM do microcontrolador como sendo a Home Position.

Sintaxe:

Comando:

(2 bytes) FFh 12h

Resposta:

(2 bytes) FFh 01h → OK

ou

FFh 10h → Erro na interpretação do comando.

STORE actual position:

O comando **Store actual position** guarda a posição actual do posicionador (X e Z). Esta posição é guardada na EEPROM do microcontrolador. O limite é de 28 pares de coordenadas X e Z.

Sintaxe:

Comando:

(2 bytes) FFh 09h

Resposta:

(2 bytes) FFh 01h → OK

ou

FFh 10h → Erro na interpretação do comando, ou limite de posições atingido.

GET positions:

O comando **GET positions** devolve todas as posições guardadas na EEPROM do microcontrolador. São enviadas as **N** posições que foram guardadas durante a aquisição. São enviadas todas as posições na coordenada Z e seguidamente todas as coordenadas X. Este é comando mais longo neste protocolo, se forem guardadas as 28 posições Z e X, serão enviados pela porta série 336 Bytes (a duração da resposta poderá demorar até 1s devido à leitura da EEPROM).

Sintaxe:

Comando:

(2 bytes) FFh 10h

Resposta:

(2xN bytes) (N x) FFh 00h ##h ##h ##h ##h

(N x) FFh 01h ##h ##h ##h ##h

00h → coordenada Z ;

01h → coordenada X ;

##h (MSB) ##h ##h ##h (LSB) → Posição em µm.

ou

FFh 10h → Erro na interpretação do comando.

SET relay:

O comando **Set relay** define o estado dos relés. Este estado pode ser Ligado ou Desligado.

Sintaxe:

Comando:

(4 bytes) FFh 30h &&h ##h

&&h → Estado do relé

00h → Desligado

01h → Ligado

##h → Número do relé.

00h → Relé 0 (Iluminação)

01h → Relé 1 (Laser)

02h → Relé 2 (extra)

03h → Relé 3 (extra)

Resposta:

(2 bytes) FFh 01h → OK

ou

FFh 10h → Erro na interpretação do comando.

GET relay:

O comando **GET relay** solicita o estado actual dos relés.

Sintaxe:

Comando:

(3 bytes) FFh 31h ##h

##h → Número do relé.

00h → Relé 0 (Iluminação)

01h → Relé 1 (Laser)

02h → Relé 2 (extra)

03h → Relé 3 (extra)

Resposta:

(3 bytes) FFh &&h ##h

&&h → Estado do relé

00h → Desligado

01h → Ligado

##h → Número do relé.

00h → Relé 0 (Iluminação)

01h → Relé 1 (Laser)

02h → Relé 2 (extra)

03h → Relé 3 (extra)

ou

FFh 10h → Erro na interpretação do comando.

GO to park position:

O comando **Go to park position** movimenta o posicionador para posição park. Esta posição corresponde à origem, $X = 0$ e $Z = 0$.

Sintaxe:

Comando:

(2 bytes) FFh 50h

Resposta:

(2 bytes) FFh 01h → OK

ou

FFh 10h → Erro na interpretação do comando, ou limite de posições atingido.

EMERGENCY stop:

O comando **Emergency stop** pára imediatamente os motores e coloca o estado do sistema no modo *emergency*.

Sintaxe:

Comando:

(2 bytes) FFh 55h

Resposta:

(2 bytes) FFh 01h → OK

ou

FFh 10h → Erro na interpretação do comando, ou limite de posições atingido.

Orçamento do Projecto Métrica Vertebral – Automático

Orçamento - Projecto Métrica Vertebral- Automático				
Componente	Modelo	Preço Unit.	Nº Unidades	Total
Calha Drylin ZLW Belt Drive (Z)	ZLW-1040-02-S-100-L, 1800mm	710,65 €	1	710,65 €
Mesa linear Drylin (X)	SHTS-12-AWM-300	401,16 €	1	401,16 €
Motor Passo a Passo + Caixa Redutora	5709L-01P with PM23 7:1 gear box installed	367,76 €	1	367,76 €
Motor passo a passo	4209L-01P	62,17 €	1	62,17 €
Driver para passo a passo	R325	167,00 €	2	334,00 €
Peças Fresador	Diversos	500,00 €	1	500,00 €
Electronica + Cabos	PIC; Placas; Calhas moveis	300,00 €	1	300,00 €
Camera Ueye + lentes	UI-1440-C	1.250,00 €	1	1.250,00 €
Apontador Laser	Laser	50,00 €	1	50,00 €
LEDS Iluminação	Leds	25,00 €	2	50,00 €
Computador	PC + Windows XP	1.000,00 €	1	1.000,00 €
Outros	Diversos	500,00 €	1	500,00 €
			Total:	5.525,74 €
			C / IVA (21%):	6.686,14 €

Configuração do Driver R325

R325 DIP Switch Settings

RUN Current				
Function	SW1	SW2	SW3	SW4
0,3 A	ON	ON	ON	ON
0,4 A	OFF	ON	ON	ON
0,5 A	ON	OFF	ON	ON
0,6 A	OFF	OFF	ON	ON
0,8 A	ON	ON	OFF	ON
1,0 A	OFF	ON	OFF	ON
1,2 A	ON	OFF	OFF	ON
1,4 A	OFF	OFF	OFF	ON
1,6 A	ON	ON	ON	OFF
1,8 A	OFF	ON	ON	OFF
2,0 A	ON	OFF	ON	OFF
2,2 A	OFF	OFF	ON	OFF
2,4 A	ON	ON	OFF	OFF
2,6 A	OFF	ON	OFF	OFF
2,8 A	ON	OFF	OFF	OFF
3,0 A	OFF	OFF	OFF	OFF

Programa “Métrica Controller V1.00”

Ficheiros:

metricacontroller.c

metricacontroller.h

Desenhos Técnicos

Circuito electrónico do *Métrica Controller*
